

การศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด



นายภูวนาด กาบคำ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

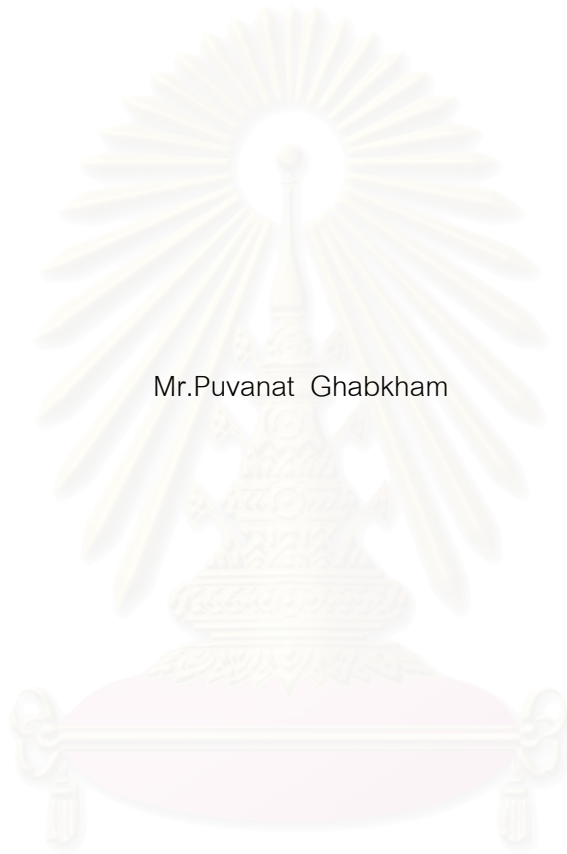
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1782-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY TO IMPROVE THE TUBULAR-ICE PRODUCTION EFFICIENCY



Mr.Puvanat Ghabkham

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1782-9



ภูวนาด กาบคำ : การศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด.

(A STUDY TO IMPROVE THE TUBULAR-ICE PRODUCTION EFFICIENCY)

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.จิตติน แดงเพียง : 120 หน้า. ISBN 974-53-1782-9.

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาระยะความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งเมื่อเทียบกับเวลาของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยทั่วไปแล้วระยะเวลาความเย็นจะส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบทำความเย็น ดังนั้นวิธีการพ่นแต่งผิวด้วยลูกปทรายที่บริเวณผิวท่อด้านนอกของเครื่องระเหยในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ในเบื้องต้นนั้นการศึกษาจะทำโดยเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างการคำนวณจากทางทฤษฎีและการตรวจวัดภาคสนามในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปท่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งจะเป็นท่อเปล่า จากการตรวจวัดในภาคสนามนั้นจะเห็นว่ากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในคาบเวลาช่วงสั้นๆ ประมาณ 20 ถึง 30 นาทีต่อรอบการผลิต ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งหลอดสู่สารทำความเย็น (แอมโมเนีย) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ในระหว่างการทำความเย็นนั้น สารทำความเย็นภายในเครื่องระเหยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอโดยการเดือด ซึ่งคุณสมบัติของแอมโมเนียที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดจะใช้ที่อุณหภูมิอิ่มตัว  $-7.5$  องศาเซลเซียส โดยในการศึกษาทางทฤษฎีนั้น จะมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นคือ กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นแบบ Quasi-steady ใน 1 มิติ และความหนาของน้ำแข็งเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยการหารูปแบบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาของระบบสมการและกระบวนการคำนวณซ้ำ ความหนาของน้ำแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาจะประมาณได้จากเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำแข็ง โดยผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าจากภาคสนามและการคำนวณจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันในเชิงคุณภาพ โดยจะเห็นว่าอัตราการผลิตน้ำแข็งและระยะเวลาความเย็นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มแรกหลังจากเริ่มการแข็งตัว หลังจากนั้นอัตราการผลิตน้ำแข็งและระยะเวลาความเย็นจะเริ่มลดลงในอัตราที่ช้าลงจนเกือบคงที่จนเสร็จสิ้นกระบวนการ จากนั้นก็นำทฤษฎีดังกล่าวไปทำนายระยะเวลาความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งหากพื้นผิวด้านนอกของท่อได้ทำการพ่นแต่งด้วยลูกปทราย จะพบว่าค่าระยะเวลาความเย็นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4570471021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: TUBULAR-ICE / EFFICIENCY/ IMPROVE / ENHANCEMENT

PUVANAT GHABKHAM : A STUDY TO IMPROVE THE TUBULAR-ICE  
PRODUCTION EFFICIENCY. THESIS ADVISOR : CHITTIN TANGTHIENG, Ph.D.  
120 pp. ISBN 974-53-1782-9.

This research is a study of cooling load and ice production rate as a function of time. Generally, the cooling load has a direct effect on the energy consumption of the system. To enhance heat transfer between the tube surface and the refrigerant (ammonia), sand blasting can be applied on the outer surface of the evaporator, resulting in a higher efficiency. In this study, the data obtained from the theoretical calculation are compared with the field data measured from an ice factory. Note that the tubes within the ice-making machine are usually plain ones. According to the field measurement, the cycle of the ice production is approximately 20 to 30 minutes. During the ice-making process, ammonia will boil within the evaporator and absorb heat from the circulated water generating ice on the inner tube surface. The properties of ammonia used in this calculation are at saturation temperature of  $-7.5^{\circ}\text{C}$ . The major assumptions of this theoretical study are one-dimensional and quasi-steady problem. However, the ice thickness, which is still a function of time, can be calculated from the boundary condition at the freezing temperature. Determination of roots of equation and iterative procedure are employed to obtain temperature at the tube surface. The measured data and the theoretical prediction have an agreement quantitatively. It is found that the ice production rate and the cooling load decrease rapidly in the early stage of solidification. Thereafter, the reduction rates of both quantities start decreasing until they are almost constant at the end of the process. By utilizing the similar method to predict the heat transfer enhancement of the rough tube generated by sand blasting, it can be seen that both cooling load increases, leading to higher ice production rate.

Department.....Mechanical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year.....2004.....Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือ และชี้แนะให้เห็นถึงข้อคิดเห็นในแง่มุมต่างๆ ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชชากร จิรกาลวสาน กรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล กรรมการ ที่ได้ร่วมให้คำปรึกษาและแนวความคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ห้างหุ้นส่วนจำกัด สินทิพย์ และ ห้างหุ้นส่วนจำกัด สาครทิพย์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ให้ผู้วิจัยได้เข้าไปทำการวิจัยและศึกษาหาความรู้ ตลอดจนช่างผู้ชำนาญการทุกท่านที่อำนวยความสะดวกอย่างสูงในระหว่างการทำวิจัย อีกทั้งยังถ่ายทอดประสบการณ์ที่มีค่าอย่างยิ่งให้แก่ผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องเครื่องมือวัดต่างๆ ที่ใช้ทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสบการณ์ในการตรวจวัดการใช้พลังงานและการทำงานร่วมกันเป็นทีมที่มีค่าอย่างยิ่งและสามารถนำไปปรับใช้ในการทำงานของผู้วิจัยต่อไปได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ. โอกาสนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือในการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและความเป็นกันเองตลอดระยะเวลาการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการดำเนินการวิจัยของผู้วิจัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 รูปแบบของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
<b>บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารูปแบบการแข็งตัวของน้ำแข็ง.....	5
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิว.....	
ลักษณะต่างๆในขณะที่สารทำความเย็นมีการเดือด.....	6
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน.....</b>	<b>11</b>
3.1 การเดือดในอ่าง.....	11



3.1.1 เส้นโค้งการเดือดในอ่าง.....	11
3.1.2 การเกิดฟองในการเดือด.....	13
3.1.3 ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน.....	15
3.2 การเพิ่มพื้นผิวในการเดือด.....	19
3.2.1 ทฤษฎีการเกิดฟองในช่วงที่มีการเดือด.....	19
3.2.2 กลไกการดักจับไอ.....	20
3.2.3 การเกิดฟองในการเดือดในชั้นขอบเขตของความร้อน.....	22
3.2.4 ความหนาแน่นของตำแหน่งการเดือด.....	23
3.3 การหุ้มผิวขรุขระ.....	24
3.3.1 ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนสูงเริ่มต้น.....	24
3.3.2 ความสัมพันธ์ของ High flux แบบใหม่.....	26
3.4 ปัญหาของการแข็งตัวภายในรูปทรงแบบทรงกระบอก.....	30
3.5 ประเภทของท่อเพิ่มการเดือดในเชิงพาณิชย์.....	32
3.5.1 ท่อที่มีครีบนอก.....	32
3.5.2 ท่อที่มีการปรับปรุงลักษณะครีบนอก.....	33
3.5.3 ท่อที่หุ้มด้วยชั้นผิวขรุขระ.....	37
3.5.4 ท่อที่มีครีภายใน.....	37
3.5.5 ท่อที่มีการเพิ่มการเดือดทั้ง 2 ด้าน.....	38
3.5.6 ท่อที่มีการสร้างท่อไว้ภายใน.....	40
3.6 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งหลอด.....	42
<b>บทที่ 4 การดำเนินการวิจัยทางภาคสนาม.....</b>	<b>43</b>
4.1 แผนการวิจัย.....	43
4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	44
4.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด.....	48
4.4 ขั้นตอนการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	50



<b>บทที่ 5 การดำเนินการวิจัยทางภาคทฤษฎี</b> .....	52
5.1 การหาค่าอัตราความร้อนที่ผ่านท่อน้ำแข็งและอุณหภูมิที่ผิวนอกของ ท่อน้ำแข็ง ณ ระดับความหนาของชั้นน้ำแข็งและเวลาต่างๆ กัน.....	52
5.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือด บนพื้นผิวเรียบ .....	52
5.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือด บนพื้นขรุขระ.....	53
5.1.3 การหาค่าอัตราความร้อนที่ไหลเกิดน้ำแข็งผ่านผนังท่อสเตนเลส สู่สารทำความเย็นที่ระดับความหนาของน้ำแข็งต่างๆ.....	54
5.2 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของน้ำแข็งกับเวลา สำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด.....	58
<b>บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล</b> .....	63
6.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ.....	63
6.1.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆในภาคสนาม.....	63
6.1.2 การหาความหนาของน้ำแข็งเมื่อเวลาต่างๆจากการคำนวณ ทางทฤษฎีสำหรับท่อผิวเรียบ.....	64
6.1.3 การหาความหนาของน้ำแข็งเมื่อเวลาต่างๆจากการคำนวณ ทางทฤษฎีสำหรับท่อน้ำแข็งที่มีผิวภายนอกขรุขระ.....	66
6.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิที่ผิวภายนอกของท่อน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ จากการคำนวณทางทฤษฎี.....	68
6.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะสารทำความเย็น มีการเดือดจากการคำนวณทางทฤษฎี.....	70
6.4 การวิเคราะห์ภาระความเย็นในขณะสารทำความเย็นมีการเดือดจาก การคำนวณทางทฤษฎี.....	72

6.5 การวิเคราะห์อัตราการผลิต ณ เวลาต่างๆจากการคำนวณทางทฤษฎี.....	74
6.6 การวิเคราะห์ผลเนื่องจากค่าคุณสมบัติของแอมโมเนีย.....	76
<b>บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>78</b>
7.1 สรุปผลงานวิจัย.....	78
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
<b>รายการอ้างอิง</b> .....	<b>81</b>
<b>บรรณานุกรม</b> .....	<b>83</b>
<b>ภาคผนวก</b> .....	<b>84</b>
ภาคผนวก ก ข้อมูลการตรวจวัดภาคสนาม.....	85
ภาคผนวก ข รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม.....	89
ภาคผนวก ค การใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมเพื่อช่วยในการวัดค่าความหนาของ น้ำแข็ง.....	94
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าคงที่ C.....	97
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าคงที่ C.....	100
ภาคผนวก ฉ ภาพเครื่องจักรในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด.....	103
ภาคผนวก ช โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับ ท่อผิวเรียบ.....	108
ภาคผนวก ฉ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับ ท่อผิวขรุขระ.....	114

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....120



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 Measured nucleation superheats.....	15
ก.1 ข้อมูลภาคสนาม.....	86
ก.2 ข้อมูลภาคสนามเมื่อมีการปรับแก้จากห้วงวัดโดยคูณค่าคงที่ 3.538.....	87
ก.3 ข้อมูลความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ.....	87
ก.4 ข้อมูลความดันขาเข้าและออกเครื่องอัดไอ.....	88
ง.1 สรุปค่า C ของแอมโมเนียที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆ.....	99
จ.1 สรุปค่า $C_r$ ของแอมโมเนียที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆ.....	102

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพของท่อทำน้ำแข็งหลอดและรูปแบบของปัญหา.....	2
3.1 Pool boiling curve .....	11
3.2 แสดงของการเดือดในแต่ละช่วง .....	13
3.3 แสดงภาพตัดขวางของพื้นผิวโลหะ .....	13
3.4 แสดงสมมูลทางกลของจุดฟองไอที่ปากกรูรูปกรวย .....	14
3.5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในขณะที่จะซีโตนเกิดการเดือด.....	17
3.6 การเกิดฟองของจุดไอที่ผิวของแข็ง.....	19
3.7 फिल्मของเหลวที่อยู่บนร่องที่ถูกเติมไว้ด้วยก๊าซ .....	20
3.8 ภาพขยายของมุมสัมผัส.....	21
3.9 liquid “foot” ของฟิล์มของเหลวที่กระจายตัวอยู่.....	21
3.10 ลักษณะของเหลวที่อยู่บนพื้นผิวขรุขระในอุดมคติ.....	22
3.11 การเกิดการเดือดในชั้นขอบเขตของความร้อน.....	22
3.12 แสดงปัญหาของการแข็งตัวภายในรูปทรงรูปทรงแบบทรงกระบอก.....	30
3.13 แผนภาพของท่อที่มีครีบท่ำ.....	32
3.14 ท่อ S/T Trufin (courtesy Wolverine Tube).....	32
3.15 ท่อที่ครีบท่ำและกลาง (courtesy Hitachi).....	33
3.16 กระบวนการของงานโลหะสำหรับท่อ Thermoexcel-E.....	34
3.17 แผนภาพของท่อ Thermoexcel-E.....	34
3.18 รูปถ่ายท่อ Thermoexcel-E (courtesy Hitachi).....	35
3.19 ท่อ Gewa-T.....	35
3.20 ท่อ Gewa-TX (courtesy Weiland-Werke).....	35
3.21 ภาพตัดขวางของท่อ Turbo-B (courtesy Wolverine Tube).....	36
3.22 ภาพถ่ายของท่อ Turbo-B (courtesy Wolverine Tube).....	36
3.23 ท่อ ECR-40.....	36
3.24 ลักษณะของท่อ High Flux (courtesy Union Carbide).....	37
3.25 ท่อ Thermofin A, B, EX, และ HEX).....	37

รูปที่	หน้า
3.26 ท่อ Thermofin-EX ในชุดแลกเปลี่ยนความร้อนอะลูมิเนียม (courtesy Hitachi)	38
3.27 ท่อที่มีการรีวแนวภายในท่อ ของ Babcock และ Wilcox	38
3.28 ท่อ Thermoexcel-HEC (courtesy Hitachi)	39
3.29 ท่อ S/T Turbo-Chil (courtesy Wolverine Tubes)	39
3.30 ท่อที่มีเกลียวของ GA Technologies	39
3.31 ท่อที่มีการย่นเป็นลูกคลื่น (courtesy Wolverine Tubes)	40
3.32 ท่อ Thermofin-CR (courtesy Hitachi)	40
3.33 ท่อเครื่องทำน้ำเย็นมีอะลูมิเนียมใส่ภายใน (courtesy Wolverine Tubes)	41
3.34 ท่อที่มีครีบอะลูมิเนียม (courtesy Hitachi)	41
3.35 วัฏจักรการทำงานของโรงน้ำแข็ง	42
4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง	44
4.2 ชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอด	45
4.3 เหล็กจับยึดรูปตัวซีเบอร์ 4	45
4.4 หัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด	46
4.5 เหล็กยึดหัววัดกับโครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็ง	46
4.6 เวอร์เนียสำหรับใช้วัดค่าความหนาของน้ำแข็ง	47
4.7 อุปกรณ์สำหรับกั้นน้ำ	47
4.8 การติดตั้งชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็ง	48
4.9 การประกอบชุดหัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด	48
4.10 การประกอบชุดทดลอง	49
4.11 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกั้นน้ำ	49
4.12 การเลือกหลอดทำน้ำแข็ง	50
4.13 การวัดค่า	51
5.1 แสดงการจำลองรูปแบบการถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้น	54
5.2 ปัญหาของการแข็งตัวภายในหลอดทำน้ำแข็งหลอด	58
5.3 ผังงานแบบง่าย (Simple flow chart)	62

รูปที่	หน้า
6.1 ความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิต.....	63
6.2 เปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณและข้อมูล ภาคสนาม.....	65
6.3 เปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิต จากการคำนวณและข้อมูลภาคสนาม.....	67
6.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิตจากการ คำนวณ.....	69
6.5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระ เทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณ.....	70
6.6 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระ เทียบกับ Wall Superheat จากการคำนวณ.....	71
6.7 เปรียบเทียบภาระความเย็นจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิต จากการคำนวณ.....	72
6.8 เปรียบเทียบภาระความเย็นจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับ Wall Superheat จากการคำนวณ.....	73
6.9 เปรียบเทียบอัตราการผลิตจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิต จากการคำนวณ.....	75
6.10 ความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาการผลิตที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆของแอมโมเนีย.....	76
6.11 ภาระความเย็นเทียบกับเวลาการผลิตที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆของแอมโมเนีย.....	77
ข.1 ชุดโครงยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งชั้นที่ 1.....	90
ข.2 ชุดโครงยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งชั้นที่ 2.....	91
ข.3 เหล็กยึดหัววัดกับโครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็ง.....	92
ข.4 หัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด.....	93
ค.1 แสดงความสัมพันธ์ของ 3 เหลี่ยมคล้าย.....	95
จ.1 เครื่องทำน้ำแข็งหลอด.....	104
จ.2 ถังเก็บแอมโมเนีย.....	104
จ.3 ถังแยกน้ำมัน.....	105



รูปที่	หน้า
จ.4 เครื่องอัดไอ.....	105
จ.5 เครื่องควบแน่น.....	106
จ.6 ถังเก็บน้ำดิบ.....	106
จ.7 ด้านบนเครื่องทำน้ำแข็งหลอด.....	107
จ.8 แผงหน้าปัดควบคุมเครื่องทำน้ำแข็งหลอด.....	107



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$a_L$	การแพร่กระจายทางความร้อนของของเหลว	$m^2/s$
A	พื้นที่	$m^2$
B	ตัวปรับแก้รูปร่างที่ได้จากทดลอง	
$C_{pL}$	ความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว	$J/(kg.K)$
d	Bubble departure diameter	m
$d_p$	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของอนุภาค	m
$D_o$	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อ	m
$D_i$	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายในของท่อ	m
$F_p$	ตัวปรับค่าความดัน	
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	$m/s^2$
$\Delta\tilde{g}$	พลังงานอิสระของโมลในการขึ้นรูป	$J/kg$
$\Delta h_v$	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	$J/mole$
$\Delta\tilde{h}_v$	ความร้อนแฝงของโมลในการกลายเป็นไอ	$J/mole$
Ja	Jakob number	
$k_1$	สภาพนำความร้อนของน้ำแข็ง	$W/(m.K)$
$k_2$	สภาพนำความร้อนของท่อ	$W/(m.K)$
$k_L$	สภาพนำความร้อนของของเหลว	$W/(m.K)$
$k_v$	สภาพนำความร้อนของไอ	$W/(m.K)$
$k_m$	สภาพนำความร้อนของชั้นผิวขรุขระ	$W/(m.K)$
$k_p$	สภาพนำความร้อนของอนุภาค	$W/(m.K)$
l	ความยาวท่อ	m
L	ความร้อนแฝง	$J/kg$
N/A	ความหนาแน่นของตำแหน่งการเดือด	$site/m^2$
$N_{cf}$	Constant heat flux number	
$Nu_D$	Nusselt number	
$P_c$	ความดันวิกฤต	$N/m^2$

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$P_r$	ความดันลดรูป	
$Pr_L$	Liquid Prandtl number	
$(dP/dT)_{sat}$	ความชันของเส้นโค้งความดันไอ	$N/(m^2.K)$
$q$	ฟลักซ์ความร้อน	$W/m^2$
$q_{max}$	ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด	$W/m^2$
$Q$	อัตราความร้อน	Watt
$r(t)$	รัศมีรูกลวงของน้ำแข็งที่เวลาใดๆ	m
$r_0$	รัศมีสุดท้ายของรูกลวงของน้ำแข็ง	m
$r_1$	รัศมีของภายในของท่อ	m
$r_2$	รัศมีภายนอกของท่อ	m
$R$	รัศมีของฟองไอ	m
$R^*$	ค่าของรัศมีของรูที่เหมาะสม	m
$Ra_p$	Rayleigh number	
$Re$	Renolds number	
$t$	เวลา	Second
$T_b$	อุณหภูมิของก้อนของเหลว	K
$T_f$	อุณหภูมิของฟิล์ม	K
$T_l$	อุณหภูมิที่หน้าประสานของฟิล์มของเหลว	K
$T_{sat}$	อุณหภูมิอิ่มตัว	K
$T_w$	อุณหภูมิผนัง	K
$T_{w,i}$	อุณหภูมิของผิวท่อภายใน	K
$T_{w,o}$	อุณหภูมิของผิวท่อภายนอก	K
$\Delta T$	Wall superheat	K
$\Delta T_{film}$	อุณหภูมิแตกต่างของชั้นฟิล์ม	K
$\Delta T_{sat}$	Boiling nucleation superheat	K
$S$	พื้นที่ผิวของฟิล์มของเหลว	$m^2$
$V$	ปริมาตรของชั้นเมตริกซ์ขรุขระ	$m^3$
$\alpha$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	$W/(m^2.K)$

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\alpha_{\text{film}}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มของเหลว	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{\text{max}}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดสูงสุด	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{\text{nb}}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเริ่มเดือด	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{\text{nc}}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อน โดยธรรมชาติ	$W/(m^2.K)$
$\beta$	มุมสัมผัส	
$\delta$	ความหนาของชั้นฟิล์มของเหลว	m
$\delta_p$	ความหนาของชั้นผิวขรุขระ	m
$\epsilon$	ค่าความขรุขระ	
$\phi$	ตัวปรับแก้การเกิดฟองที่ต่างกัน	
$\eta$	Average pore diameter	m
$\mu_L$	ค่าความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว	$N.s/m^2$
$\mu_v$	ค่าความหนืดพลศาสตร์ของไอ	$N.s/m^2$
$\nu_L$	ค่าความหนืดจลศาสตร์ของของเหลว	$m^2/s$
$\nu_v$	ค่าความหนืดจลศาสตร์ของไอ	$m^2/s$
$\theta$	มุมรูปติ่มของร่องหรือรูรูปกรวย	
$\rho_L$	ความหนาแน่นของของเหลว	$kg/m^3$
$\rho_v$	ความหนาแน่นของไอ	$kg/m^3$
$\sigma$	แรงตึงผิว	N/m
$\lambda$	Geometric scale factor	

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

เนื่องด้วยในปัจจุบันในประเทศไทยมีโรงงานน้ำแข็งอยู่เป็นจำนวนมากจากการที่การขนส่งจะทำได้ในระยะใกล้ๆ จึงต้องมีโรงงานอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัยและธุรกิจอุตสาหกรรมต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้น้ำแข็งในการบริโภคและการดำเนินการ และแนวโน้มของการขยายตัวของแหล่งที่อยู่อาศัยและภาคธุรกิจในปัจจุบันนี้มีการเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งก็ทำให้มีการตั้งโรงงานในอุตสาหกรรมประเภทนี้มากขึ้นสูงตามไปด้วย และในกระบวนการผลิตการผลิตแต่ละครั้งนั้นจำเป็นต้องใช้เวลานานทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งนี้ซึ่งค่าใช้จ่ายในการซื้อพลังงานไฟฟ้าก็สูงมากเช่นกัน การที่กระบวนการผลิตใช้พลังงานน้อยลงและได้ประสิทธิภาพที่มากขึ้นนั้นก็จะสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายในส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าได้

การปรับปรุงพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนนี้ได้เริ่มมีการศึกษาและพัฒนากันมาตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1950 โดยส่วนใหญ่เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนและการปรับปรุงสภาพการเดือดซึ่งถือความก้าวหน้าที่สำคัญ วิธีที่กล่าวมานั้นจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวแปรในส่วนของรูปทรงของพื้นผิวที่จะมีผลต่อสมรรถภาพโดยรวมของระบบให้ดีขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมแพร่หลายและมีการค้นคว้าวิจัยในด้านนี้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยที่ผ่านมามีการนำไปใช้ในหลายๆการใช้งานไม่ว่าจะเป็นงานเกี่ยวกับฮีทไปป์หรือเพื่อระบายความร้อนในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น

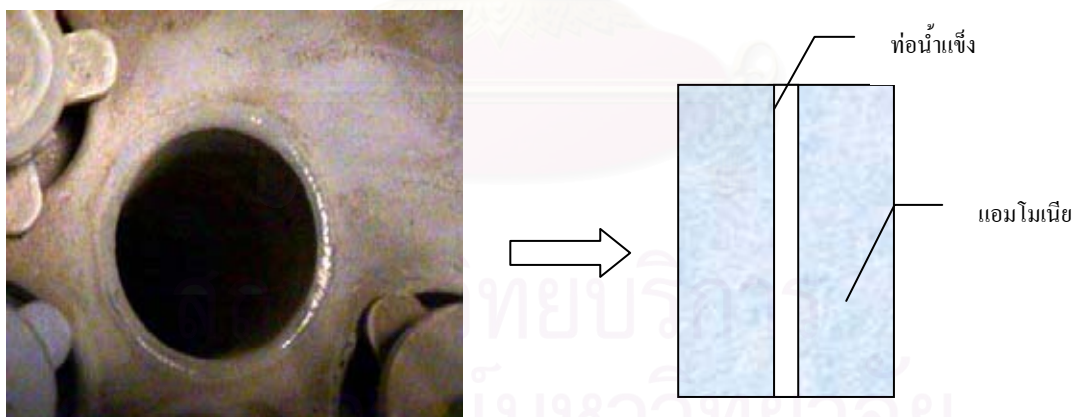
เมื่อพิจารณาในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดแล้วจะพบว่า มีอุปกรณ์และเครื่องจักรหลักๆ อยู่ 4 ส่วนด้วยกันคือ เครื่องอัดไอ, วาล์วลดความดัน, ชุดคอยล์เย็นและชุดคอยล์ร้อน โดยใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น ซึ่งส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนได้แก่ เครื่องควบแน่นและชุดคอยล์เย็น โดยเครื่องควบแน่นจะมีการถ่ายเทความร้อนจากแอมโมเนียที่มีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูงออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก และชุดคอยล์เย็นจะเป็นส่วนที่ดึงความร้อนจากน้ำดิบที่จะมาทำเป็นน้ำแข็งมาสู่แอมโมเนียที่ไหลภายในระบบทำความเย็น ซึ่งหากเราสามารถเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในทั้ง 2 ส่วนนี้ได้จะสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดไอลงได้ หรือสามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตขึ้นได้

ในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่ชุดคอยล์เย็นในส่วนของวัสดุที่ใช้ทำท่อที่ใช้บรรจุน้ำดิบ เพื่อที่จะผลิตเป็นน้ำแข็งหลอด การออกแบบระบบทางความร้อนของชุดคอยล์เย็นนี้ซึ่งจะลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจะมีการเดินของสารทำความเย็นภายในหรือภายนอกของพื้นผิวท่อโดยปรับปรุงสภาพพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนในส่วนที่สัมผัสกับสารทำความเย็นซึ่งในการวิจัยนี้จะเป็นการเดินภายนอกของพื้นผิวท่อ ให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น โดยการทำให้พื้นผิวส่วนที่สัมผัสกับสารทำความเย็นมีพื้นผิวที่ขรุขระโดยการตกแต่งพื้นผิว ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น การพ่นเปลวไฟหรืออนุภาคต่างๆไปที่พื้นผิว, ชุบผงต่างๆไปที่ผนังท่อหรือใช้โฟมที่มีรูพรุนหุ้มรอบๆ ท่อ และใช้วิธีการบัดหรือพ่นต่างๆ กับพื้นผิว

## 1.2 รูปแบบของปัญหา

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งศึกษาในส่วนของท่อทำน้ำแข็งหลอดซึ่งส่วนของตัวท่อจะแช่อยู่ในสารทำความเย็น (แอมโมเนีย) ซึ่งจะถึงความร้อนของจากน้ำดิบที่อยู่ในท่อ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ภาพของท่อทำน้ำแข็งหลอดและรูปแบบของปัญหา

## 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อทำการศึกษาทั้งในทางทฤษฎีและการตรวจวัดข้อมูลภาคสนามเพื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตน้ำแข็งหลอด

#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดและการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเดือดบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวที่มีการตกแต่งให้มีผิวขรุขระ
2. ทำการประยุกต์ทฤษฎีที่มีอยู่เพื่อหาความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเดือดบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวที่มีการตกแต่งให้มีผิวขรุขระเพื่อใช้ในการหาอัตราความร้อนที่ถ่ายเทผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอด และอัตราการผลิตน้ำแข็งหลอดเมื่อเทียบกับเวลา
3. ทำการวัดและเก็บข้อมูลของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอัตราการผลิตน้ำแข็ง
4. ทำการเปรียบเทียบอัตราการผลิตที่ได้จากการเก็บข้อมูลในโรงงานกับผลการวิเคราะห์ในข้อ 2 . เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ท่อทำน้ำแข็งที่มีการตกแต่งผิวให้ขรุขระ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในขณะที่สารทำความเย็นมีการเดือดทั้งบนพื้นผิวเรียบและขรุขระที่ได้นำมาประยุกต์เพื่อหาอัตราการผลิตของน้ำแข็งหลอด
2. สามารถใช้ข้อมูลที่เกิดขึ้นรวมรวมจากโรงงานมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในภาคอุตสาหกรรมน้ำแข็งหลอดต่อไป

#### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนท่อทำน้ำแข็งให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น
2. ทำการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาประยุกต์ใช้กับการอัตราถ่ายเทความร้อนและอัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด
3. ทำการสร้างเครื่องมือวัดอย่างง่ายสำหรับวัดระดับความหนาของชั้นน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในท่อทำน้ำแข็งหลอด



4. ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับภาระทางความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งหลอดโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด
5. ทำการเปรียบเทียบที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 2 กับข้อมูลที่ได้จากข้อ 4. เพื่อหาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริงของท่อที่มีการตกแต่งพื้นผิวภายนอกกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด
6. สรุปผลการวิจัยและจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาดังกล่าวถึงกระบวนการผลิตน้ำแข็งนี้ จะพิจารณาถึงรูปแบบของการแข็งตัวของน้ำเป็นน้ำแข็งเมื่อเทียบกับเวลาในคาบเวลาการผลิตและการถ่ายเทความร้อนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะเดือด (อยู่ในสถานะของเหลวและไอ) ผ่านพื้นผิวที่มีลักษณะรูปแบบต่างๆกันไป ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านๆมาจะสามารถแบ่งออกเป็นสองหัวข้อใหญ่คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารูปแบบการแข็งตัวของน้ำแข็ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวลักษณะต่างๆ ในขณะที่สารทำความเย็นมีการเดือด

##### 2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารูปแบบการแข็งตัวของน้ำแข็ง

รจนา ประไพนพ (2545) ได้เสนอจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นน้ำแข็ง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยการพิจารณาจุดต่อแบบอยู่กับที่และคำนวณปริมาณความร้อนแฝงจากค่าความร้อนสัมผัส โดยสมมติตัวแปรให้มรรการกระจายตามระยะทางเชิงเส้นตรง และประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยระบบ two-time level scheme 3 แบบ ได้แก่ explicit, Crank-Nicolson และ fully implicit นอกจากนี้ยังได้เสนอการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่รอยต่อสถานะ 3 รูปแบบ คือ (1) เท่ากับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะของแข็ง (2) เท่ากับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะของแข็งและของเหลว (3) เท่ากับค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิกของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะของแข็งและของเหลว สำหรับการเปลี่ยนสถานะในหนึ่งมิติพบว่าผลเฉลยที่ได้จากการประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทุกวิธีมีค่าใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง และในการพิจารณารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่รอยต่อสถานะได้ผลว่า ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่รอยต่อสถานะด้วยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะของแข็ง จะได้ผลเฉลยจากการจำลองแบบที่มีความใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมากที่สุด ส่วนในกรณีการเปลี่ยนสถานะสองมิติในกรณีที่ thermal diffusivity มีค่าเท่ากันทั้งสองสถานะเนื่องจากข้อจำกัดของผลเฉลยแม่นยำตรง

ได้ผลเฉลยโดยประมาณมีความใกล้เคียงผลเฉลยแน่นอนตรงเป็นอย่างดี และพบว่าวิธี explicit มีการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

Pekeris and Slichter (1939) ได้ทำการหาผลเฉลยของปัญหาที่ไม่ใช่เชิงเส้นของการเกิดน้ำแข็งบนทรงกระบอกยาว โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ผิว (ซึ่งต้องต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  เสมอ) ซึ่งค่าความถูกต้องอันดับแรกที่ได้จากคำนวณและพบจากสภาวะคงที่มีค่าน้อย ซึ่งยกตัวอย่าง เช่น ปัญหาการประยุกต์ใช้งานในกรณีพิเศษ เช่น การแช่แข็งโดยทราย

### 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวลักษณะต่างๆ ในขณะที่สารทำความเย็นมีการเดือด

Bergles (1959) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบความร้อนโดยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบการเดือดในขณะที่ค่าฟลักซ์ความร้อนมากกว่า  $10^8 \text{ W/m}^2$  ซึ่งอยู่สภาวะที่ต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวังซึ่งได้ค้นพบเกี่ยวกับการลดลงของค่าความร้อนวิกฤตในสภาวะการเดือดแบบไหลบนท่อที่การหุ้มผิวขรุขระ และการลดลงของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตบนเทพที่บิดเกลียวในการเดือดอิมเมอร์ส

Janusz and Cieslinski (2002) ได้ศึกษาสภาวะการเดือดของน้ำกลั่นที่ความดันบรรยากาศบนท่อสเตนเลสที่ให้ความร้อนโดยไฟฟ้าโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลายๆ ขนาดและบนแผ่นราบ โดยที่ผิวมีการทำให้เรียบและมีการหุ้มผิวที่ขรุขระด้วยการพ่นด้วยทราย โดยมีการใช้กรรมวิธีหลายๆ อย่าง เช่น electrolytic treatment, plasma spraying, gas-flame spraying และ modified gas-flame spraying เพื่อให้ผิวมีการครอบคลุมด้วยโลหะ โดยเพื่อศึกษาผลของความขรุขระของพื้นผิวต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านๆ มาเป็นพื้นฐาน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดบนผิวขรุขระ ซึ่งได้ผลดังนี้

- สำหรับผิวที่มีการหุ้มทุกแบบที่ค่า wall superheat ต่ำๆ เมื่อเทียบกับผิวเรียบแล้วจะพบว่า หนึ่งในท่อผิวขรุขระสามารถทำให้เกิดการเดือดได้ที่ค่า wall superheat อย่างน้อยประมาณ  $0.1 \text{ K}$

- ผิวที่ปกคลุมด้วยโลหะจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าผิวเรียบที่ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนเดียวกัน โดยที่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- ผิวที่ประกอบด้วยอลูมิเนียมจะให้ผลที่ดีมาก ๆ ในการเกิดการเดือดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ โดยตัวแปรหลักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนคือ ความหนาและความขรุขระ โดยที่ไม่ขึ้นโดยไม่ขึ้นกับกรรมวิธีสร้างขึ้นมา แต่ปัจจัยที่สำคัญคือการสัมผัสของโลหะระหว่างชั้นผิวขรุขระกับลักษณะในการสัมผัส
- ฟลักซ์ความร้อนที่ทำให้เกิดการเดือดที่มีการเผาไหม้ในช่วง 1.03 ถึง 1.53 MW/m<sup>2</sup> จะไม่ขึ้นกับสภาพพื้นผิวที่ทำการศึกษา
- ซีดจำกัดของฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง (CHF) จะถูกกำหนดโดยอัตราการเกิดไอที่วิ่งออกมาโดยที่ไม่ถูกเส้นทางที่ของเหลวไหลปิดกั้นมากกว่าที่เกิดขึ้นเองที่พื้นผิว (อัตราการเกิดไอ)

Jiang (2001) ได้ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของการระเหยของไมโครฟิล์มและการไหลแบบ 2 สถานะภายในโครงสร้างระดับไมโครเพื่อใช้ในการหาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนในระดับไมโครของการถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวขรุขระ โดยผลที่ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากองค์ประกอบต่างๆ ของของไหลและขนาดของโครงสร้างที่มีต่อสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนระหว่างที่มีการเกิดฟอง โดยใช้สารทำงานคือ R11, R22, R134a และน้ำ ซึ่งได้ผลคือ สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากผิวที่ขรุขระนั้นจะทำให้อัตราการระเหยในชั้นของฟิล์มของเหลวที่อยู่ในช่องเล็กๆ เพิ่มมากขึ้น โดยคุณสมบัติที่สำคัญของของไหลคือแรงตึงผิวและการระเหย

Luke and Gorenflo (2000) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของขนาดของตำแหน่งการเกิดฟองบนผิวภายนอกท่อทองแดงและเหล็กที่วางตัวในแนวนอนโดยมีการตกแต่งผิวในหลายๆ รูปแบบ และคำนวณการถ่ายเทความร้อนในหลายระดับฟลักซ์ความร้อนและความดัน โดยได้ใช้แบบจำลองของ Schomann มาร่วมใช้ในการคำนวณด้วย โดยได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพวีดีโอความเร็วสูง โดยผลที่ได้จากแบบจำลองนี้จะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนสูงเมื่อค่าความดันอิ่มตัวปกติมีค่าสูง

Mertz et al. (1997) ได้ทำการศึกษาท่อที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีการปรับปรุงโครงสร้างผิว โดยใช้ท่อผิวเรียบ 1 ท่อเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและท่อที่มีปรับปรุงผิว 4 ท่อที่แตกต่างกันโดยท่อทำจากเหล็กคาร์บอน St35.8 และใช้ไอโซบิวเทน N 35 เป็นสารทำงานที่จุดเดือด 248 ถึง 293 K และฟลักซ์ความร้อนระหว่าง 2 ถึง 100 kW/m<sup>2</sup> ซึ่งได้ผลว่าท่อที่มีการปรับปรุงพื้นผิวนั้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อผิวเรียบประมาณ 4 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14 kW/m<sup>2</sup>K ในช่วงของฟลักซ์ความร้อนระหว่าง 40 ถึง 60 kW/m<sup>2</sup>

Mertz et al. (1998) ได้ทำการทดลองศึกษาการเพิ่มพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของการระเหยของท่อ ตัวอย่างเช่น ชุดถ่ายเทความร้อนแบบสองสถานะในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยที่ IKE ทำการศึกษากังท่อนที่ติดครีปที่มีความสม่ำเสมอและครีปที่มีขนาดไม่เท่ากัน, MATT ทำการศึกษาระหว่างท่อผิวเรียบและท่อที่มีผิวขรุขระ และ TGDD ได้สร้างท่อที่มีรูบนผิวซึ่งมีลักษณะสมมาตรและไม่สมมาตรในสามมิติ ซึ่งได้ผลว่าท่อที่มีการปรับปรุงผิวภายนอก (ติดครีปและทำให้ผิวขรุขระ) ที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อเรียบอย่างมาก ส่วนเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเรียบเล็กน้อย ส่วนตำแหน่งการเกิดฟองจะมีมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรูเล็ก ๆ ในส่วนล่างของช่องว่างครีป ส่วนลักษณะรูปร่างของรูบนพื้นผิวนั้นจะมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการเดือดแต่จากการทดลองนี้พบว่ารูที่ลักษณะไม่สมมาตรนั้นไม่ได้ให้ผลที่ดีกว่ารูที่มีลักษณะสมมาตร เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับท่อผิวเรียบจะมีค่าสูงกว่าอยู่ระหว่าง 1.6 ถึง 2.5 เท่า

Mertz and Groll (2002) ได้ทำการทดสอบท่อที่มีการปรับปรุงพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนในสภาวะของ pool boiling โดยใช้โพรเพนเป็นสารทำงานที่ความดันลดรูป 0.08 ถึง 0.2 ที่อุณหภูมิ 263 ถึง 293 K โดยเลือกใช้ท่อ GEWA-K (มี 30 ครีป/นิ้ว) และ GEWA-PB (มีลักษณะของครีปที่ไม่สม่ำเสมอ) โดยใช้ท่อผิวเรียบอ้างอิง โดยในการทดสอบได้ทดสอบทั้งแบบท่อเดี่ยวและในลักษณะที่เป็นมัดท่อ (แถวละ 2 ท่อ) ซึ่งได้ผลว่าที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 kW/m<sup>2</sup>) ท่อทั้ง 2 ชนิดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเรียบ 1.5 และ 4 เท่า ตามลำดับ ส่วนที่ฟลักซ์ความร้อนสูง ท่อ GEWA-K ให้ค่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง 1.1 เท่า แต่ท่อ GEWA-PB จะให้ค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าฟลักซ์ความร้อนที่ 60 kW/m<sup>2</sup> จะให้ค่าค่อยๆ ลดลง ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบแล้วจะพบว่าท่อทั้ง 2 ชนิด



ให้สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น และที่ฟลักซ์ความร้อน  $135 \text{ kW/m}^2$  จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากัน ส่วนในกรณีที่เป็นมัดท่อจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าเสมอในกรณี GEWA-K จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนค่าใกล้เคียงกับกรณีท่อเดี่ยว และ GEWA-PB จะให้ผลที่แตกต่างออกมาเล็กน้อย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของมัดท่อจะมีค่าที่น้อยกว่าท่อเดี่ยว ส่วนการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงฟลักซ์ความร้อน 50 ถึง  $60 \text{ kW/m}^2$  จะมีน้อยมาก

Nishikawa and Ito (1982) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนขณะที่เริ่มมีการเดือดเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีการปรับปรุง โดยทำการทดลองบนท่อทรงกระบอกที่วางแนวราบโดยที่ผิวมีการทำให้ขรุขระโดยใช้ผงโลหะบดโดยใช้ท่อที่ทำจากทองแดงและทองเหลืองกับสารทำความเย็น R-11, R-113 และเบนซิน ภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งได้สร้างความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวที่มีการปรับปรุงให้ขรุขระโดยสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของทั้งส่วนของสารทำความเย็นและส่วนของพื้นผิว โดยพบว่าเมื่อใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคในช่วง 100 ถึง 1000 ไมโครเมตร และความหนาของชั้นผิวขรุขระ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ผลที่ได้ส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์จากข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมา และจากการทดลองพบว่าค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงกว่าท่อที่มีผิวเรียบประมาณ 10 เท่าตัวในช่วงที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำๆ

Scurlock (1995) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดของไนโตรเจนเหลว, อาร์กอน, ออกซิเจนและ R12 บนพื้นผิวแผ่นราบที่มีการทำให้ผิวขรุขระโดยวิธี plasma spraying โดยอลูมิเนียมบริสุทธิ์และการหุ้มด้วยอลูมิเนียม/ซิลิกอน ซึ่งหลังจากการหุ้มแล้วพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่าของผิวเรียบที่ไม่ได้มีการปรับปรุง โดยในการทดลองนี้ได้มีการสร้างสภาวะในการทดลองเป็น 2 สภาวะคือ ฟลักซ์ความร้อนคงที่ (สภาวะในห้องปฏิบัติการ) และอุณหภูมิของผนังคงที่ (สภาวะของโรงงานอุตสาหกรรมทำความเย็น)

Shou-Shing and Chun-Jen (1997) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนขณะที่สารทำความเย็นมีการเดือดจากพื้นผิวที่มีการห่อหุ้มซึ่งจมอยู่ในสารทำความเย็น R-134a และ R-407c กับผิวขรุขระโดยอะลูมิเนียม, ทองแดง, โมลิบดีนัม บนพื้นผิวของทองแดง โคนศึกษาอิทธิพลของ

ความหนาของผิวที่ห่อหุ้มและความขรุขระที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและสมมติฐานในการเดือดที่ เคยศึกษามา โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในผิวที่มีการตกตะกอนจะมีค่าเป็น 2.5 เท่าของ พื้นผิวเรียบ โดยได้เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของ Rudemiller and Lindsay ที่ใช้สำหรับ พื้นผิวที่ผ่านการพ่นด้วยเปลวไฟและพลาสมาในเทอมของ Reynolds number ที่ได้จากค่าเส้นผ่า ศูนย์กลางของรูและความขรุขระ, Jakob number, Constant heat flux number และปัจจัย ทางด้านรูปร่าง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเห็นได้ว่าพื้นผิวที่มีการตกตะกอนให้ขรุขระเมื่อมีการ เดือดของของไหลเกิดบนพื้นผิวนี้อาจให้ค่าสัมประสิทธิ์การทดลองที่สูงกว่าการเดือดที่เกิดขึ้นบน พื้นผิวเรียบเมื่อค่าของฟลักซ์ความร้อนต่ำๆ แต่เมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าการเดือดบนพื้นผิวเรียบเล็กน้อย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

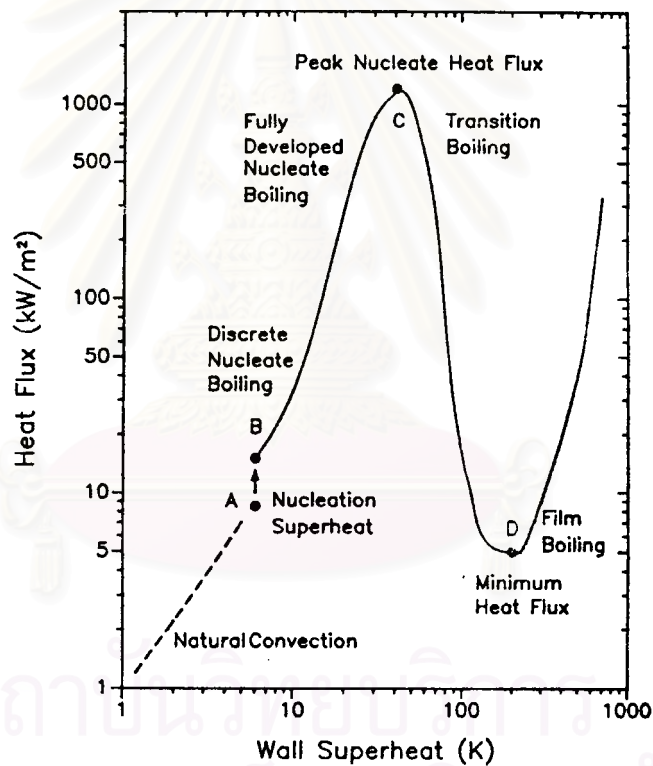


### บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 การเดือดในอ่าง (Pool boiling)

#### 3.1.1 เส้นโค้งการเดือดในอ่าง (Pool boiling curve)

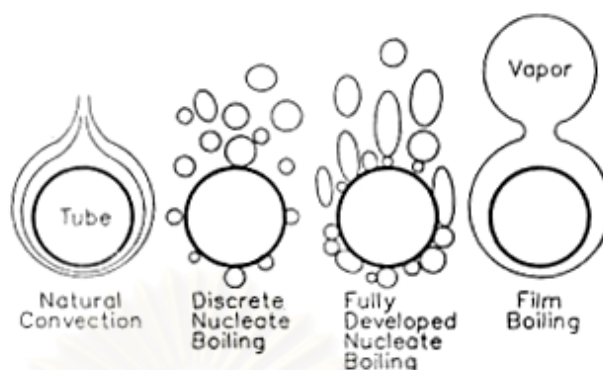


รูปที่ 3.1 Pool boiling curve

การถ่ายเทความร้อนแบบ Pool boiling โดยส่วนมากจะอธิบายได้ง่ายๆ โดย Pool Boiling curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากผนังกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวของผนังที่ร้อนและกลุ่มของเหลวที่รอบล้อมอยู่ (Wall superheat) ดังรูปที่ 3.1 โดยแบ่งเส้นโค้งออกเป็น 4 ขอบเขตดังนี้

- 1) Single – phase natural convection : จะเริ่มมีผลตั้งแต่ค่าของ Wall superheat ต่ำที่สุดที่ตำแหน่ง A ซึ่งมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของของเหลวที่ใช้เริ่มต้นในการเดือดซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดการพาความร้อนโดยธรรมชาติ โดยที่อุณหภูมิของของเหลวที่อยู่ชั้นขอบเขตความร้อนมีค่าสูงกว่าจุดเดือดซึ่งสถานะของของเหลวเป็นไอตรง (Superheated) จนกระทั่งที่ผนังเกิดเม็ดฟองเม็ดแรกขึ้นมา
- 2) Nucleate boiling : เริ่มจากการฟองแยกตัวออกจากผนังโดยที่ค่าของ Wall superheat ยังมีค่าที่ต่ำอยู่ซึ่งเราสามารถเรียกได้อีกชื่อว่า Discrete boiling region (ตำแหน่ง B) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของเส้นโค้งที่ตำแหน่ง C ซึ่งเรียกตำแหน่งนี้ว่า Peak nucleate heat flux ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้จะเริ่มเกิดฟิล์มของไอ (Vapor film) ขึ้น
- 3) Transition boiling : จะเริ่มหลังจากตำแหน่ง C ของเหลวจะสัมผัสกับผนังเป็นบางส่วนทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังกับของเหลวลดต่ำลงและจะต่ำลงจนกระทั่งถึงตำแหน่ง D ซึ่งเป็นจุดที่ฟลักซ์ความร้อนมีค่าต่ำที่สุด (Minimum heat flux) ซึ่งไอจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนเป็นฟิล์มปกคลุมพื้นผนัง
- 4) Film boiling : จะเกิดฟิล์มปกคลุมพื้นผนังจนหมดซึ่งการถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะเป็นการนำความร้อนและการพาความร้อนที่จุดเชื่อมกันระหว่างของเหลวและไอซึ่งจะมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ต่ำโดยที่สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนนั้นมีค่าต่ำมากแต่ Wall superheat จะมีค่าสูงขึ้นมา ซึ่งจะทำให้เกิดการหลอมละลายของวัสดุที่ใช้ทำผนังซึ่งเป็นช่วงที่ต้องหลีกเลี่ยง โดยในช่วงขอบเขตนี้ค่าของฟลักซ์ความร้อนจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและพื้นผิวของผนังจะถูกทำให้ร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งความร้อน

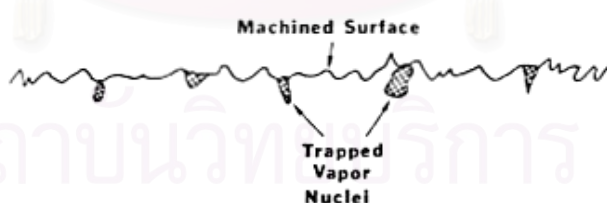
โดยการเกิดฟองไอสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงลักษณะของการเกิดฟองไอในช่วงการเดือดต่างๆ



รูปที่ 3.2 แสดงของการเดือดในแต่ละช่วง

### 3.1.2 การเกิดฟองในการเดือด (Boiling nucleation)

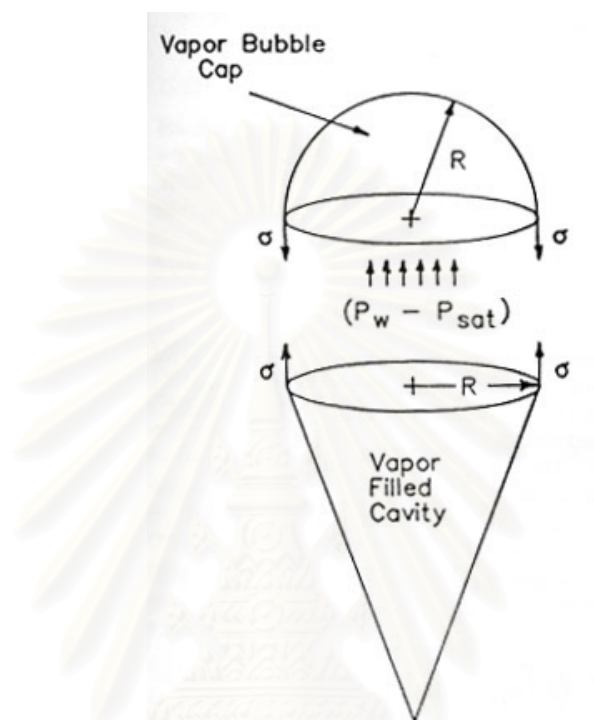
การโตขึ้นของฟองไอและการแยกตัวออกจากผนังในการเดื่อนั้นจะเริ่มเกิดขึ้นจากร่อง, รู หรือหลุมโพรงเล็กบนพื้นผิว พื้นผิวที่เห็นว่าเรียบเมื่อมองด้วยตาเปล่า นั้นอาจจะมีพื้นผิวที่ขรุขระได้ เมื่อมองผ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ช่องรูจะมีหลากหลายขนาด, รูปร่างและความลึกบนพื้นผิวดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งรูเหล่านี้จะดักจับไอและก๊าซเอาไว้ซึ่งมันจะสร้างจุดฟองเล็กๆ (Nuclei) ซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นฟองไอต่อไปโดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเหล่านี้ที่จะสามารถเกิดฟองขึ้นได้จะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัดขวางของพื้นผิวโลหะ

เพื่อให้จุดเล็กเหล่านี้มีเสถียรภาพจะต้องมีการรักษาสมดุลทั้งด้านความร้อนและทางกลกับผนังที่ร้อนและของเหลวรอบๆ สำหรับสมดุลทางความร้อนอุณหภูมิของไอที่อยู่ในจุดฟองจะเท่ากับอุณหภูมิของผนังและของของเหลว ถ้าอุณหภูมิของของเหลวมีค่าน้อยกว่าไอที่อยู่ในจุดฟอง จุดฟองไอนี้จะค่อยๆ เล็กลงและสลายหายไป ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของของเหลว

มากกว่าของไอในจุดฟองและจุดเดือด จุดฟองเหล่านั้นจะค่อยๆโตขึ้นและกลายเป็นฟองไอที่ผนังต่อไป



รูปที่ 3.4 แสดงสมดุลทางกลของจุดฟองไอที่ปากกรวย

สำหรับสมดุลทางกลจะเกิดขึ้นเมื่อความดันแตกต่างระหว่างภายในและภายนอกจุดฟองของไอซึ่งต้องสมดุลโดยแรงตึงผิวที่หน้าประสานระหว่างของเหลว-ไอ-โลหะ, ดังรูปที่ 3.4 เพราะความดันภายในจุดฟองจะมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอก, จุดเดือดของไภายในจุดฟองนั้นจะสูงกว่าจุดเดือดของก้อนของเหลวภายนอก เนื่องมาจากว่าอุณหภูมิของของเหลวที่ล้อมรอบจะสูงกว่าจุดเดือดของตัวเอง (คือ ของเหลวจะถูกทำให้เป็นไอลงไปด้วย) เมื่อมีสมดุลทางความร้อนอยู่ด้วย การเกิดฟองจะต้องมีทั้งสมดุลทางความร้อนและทางกลสำหรับการเกิดนิวเคลียสของไอรัศมี  $R$  ที่ยึดติดที่พื้นผิวให้ความร้อนโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta T_{\text{sat}} = \frac{2\sigma}{R(dP/dT)_{\text{sat}}} \quad (3.1)$$

โดยรัศมี R นั้นโดยทั่วไปจะเป็นตัวไม่ทราบค่า เพราะฉะนั้นการเกิดฟองจะสามารถทำนายได้ยากกว่าจะเกิดที่จุดใดของพื้นผิว ยกตัวอย่างเช่น, ตารางที่ 3.1 จะแสดง nucleation superheat ที่วัดโดย Thome, Shakir, และ Mercier (1982) และโดย Shakir และ Thome (1986) สำหรับของไหลบริสุทธิ์หลายๆ ชนิด สังเกตจากตารางจะพบว่าสำหรับเอทานอลเมื่อเปลี่ยนใช้ระหว่างจานและท่อแล้วจะมีความแตกต่างกันอย่างมากซึ่งถือเป็นสิ่งแรกที่สะท้อนความแตกต่างของการใช้พื้นผิวที่มีความขรุขระและขนาดของรูที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.1 Measured nucleation superheats

Fluid/surface combination	Pressure, bar	Superheat, K
Nitrogen/copper disk	1.11	1.6
Argon/copper disk	1.25	2-3
Water/copper disk	1.01	6-8
Water/copper tube	1.01	4-8
Ethenol/copper disk	1.01	23-24
Ethenol/copper tube	1.01	6-10
n-Propanol/copper tube	1.01	8
Methanol/copper tube	1.01	9-10
Benzene/copper tube	1.01	10-11

### 3.1.3 ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer correlations)

3.1.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural convection) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.1 จะสามารถทำนายพฤติกรรมได้โดยความสัมพันธ์ของ Churchill และ Chu (1975) สำหรับ single isolated, ทรงกระบอกในแนวนอนที่มีสภาวะอุณหภูมิคงที่ที่ผนัง :

$$\text{Nu}_D = 0.36 + 0.518\text{Ra}_D^{1/4} \left[ 1 + \left( \frac{0.559}{\text{Pr}_L} \right)^{9/16} \right]^{-4/9} \quad (3.2)$$

เมื่อ Rayleigh number นั้นได้มาจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ดังนี้

$$\text{Ra}_D \equiv \frac{g\beta_L \Delta T D_o^3}{\nu_L a_L} \quad (3.3)$$

และค่า Nusselt number เฉลี่ยบนพื้นผิวของทรงกระบอกจะหาได้จาก

$$\text{Nu}_D \equiv \frac{\alpha_{nc} D_o}{k_L} \quad (3.4)$$

ซึ่งสมการที่ (3.2) สามารถใช้งานได้ในช่วง

$$10^{-4} \leq \text{Ra}_D \leq 10^9 \quad (3.5)$$

โดยคุณสมบัติของของไหลจะหาที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผนังที่ร้อนกับของเหลว

**3.1.3.2 การเดือดในช่วงการเกิดฟอง (Nucleate pool boiling)** สำหรับในขอบเขตนี้, ความสัมพันธ์ของ Mostinski (1963) จะสามารถประยุกต์ใช้ได้โดยง่ายเนื่องจากสามารถใช้กับของไหลบริสุทธิ์ได้หลากหลายชนิดและความดันลดรูป (Reduced pressure) ได้ในช่วงที่กว้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha_{nb} = 0.00417q^{0.7} P_c^{0.69} F_p \quad (3.6)$$

เมื่อ  $h_{nb}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงของการเดือดในช่วงการเกิดฟอง (The nucleation pool boiling heat transfer coefficient),  $q$  คือค่าฟลักซ์ความร้อน,  $P_c$  คือความดันวิกฤตของของไหล, และ  $F_p$  คือตัวปรับแก้ความดัน (The pressure correction factor) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_p = 1.8P_r^{0.17} + 4P_r^{1.2} + 10P_r^{10} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $P_r$  ความดันลดรูป สำหรับการเดือดในช่วงที่เกิดฟอง, เพื่อความสะดวกจะประมาณค่าของคุณสมบัติของของไหลที่อุณหภูมิจุดเดือดของของไหลเอง

เมื่อเร็วๆ นี้ Stephan และ Abdelsalam (1980) ได้พัฒนาความแม่นยำของความสัมพันธ์ของการเดือดในช่วงการเกิดฟองขึ้นสำหรับของไหลหลายๆ ชนิด ซึ่งความสัมพันธ์นี้



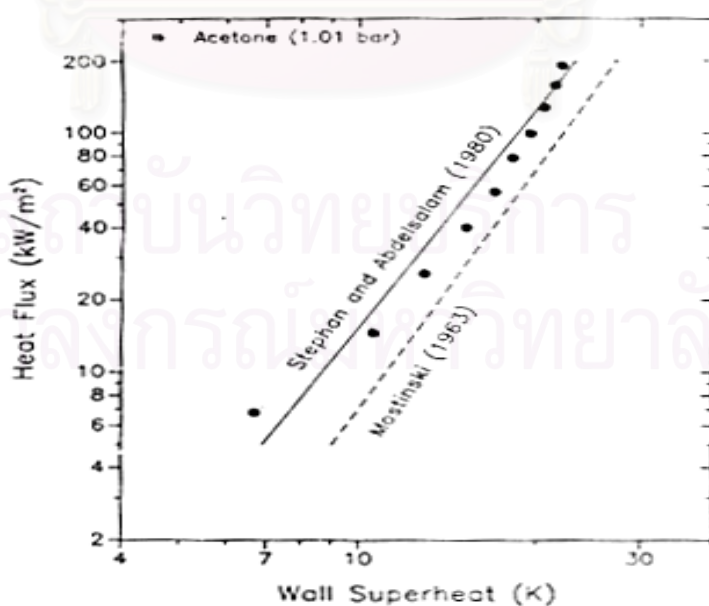
มาจากคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลซึ่งค่อนข้างจะดีกว่าการใช้ความสัมพันธ์จากความดันที่ลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ของของไหลอินทรีย์คือ

$$\frac{\alpha_{nb} d}{k_L} = 0.0546 \left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \left( \frac{q d}{k_L T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \left( \frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{0.248} \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33} \quad (3.8)$$

เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่แยกตัวออกมา  $d$  สามารถหาได้จาก

$$d = 0.0146 \beta \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

ซึ่งเพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณโดยส่วนมากผู้สังเกตการณ์จะคงค่ามุมสัมผัส (Contact angle) อยู่ที่  $35^\circ$  สำหรับของไหลทุกๆ ชนิดโดยไม่ต้องพิจารณาถึงค่าที่แท้จริง ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ได้โดยไม่ขึ้นว่าจะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนของ Sardesai, Palen, และ Thome (1986) และสารพวกแอลกอฮอล์และสารทำละลายต่างๆ ของ Thome, Shakir (1987) และ Bajorek (1988) ซึ่งทั้งหมดจะใช้ที่การเดือดภายนอกของท่อที่วางแนวนอนท่อเดียว



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในขณะที่จะซีโตนเกิดการเดือด



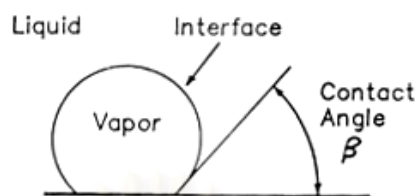
รูปที่ 3.5 จะแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ Mostinski (1963) และ Stephan กับ Abdelsalam (1980) กับข้อมูลที่ได้จาก Uhlig และ Thome (1985) สำหรับการเดือดของอะซีโตนบนท่อทองแดงแนวนอน (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19.05 มม.) ซึ่งความสัมพันธ์ของ Stephan กับ Abdelsalam จะให้ความสอดคล้องได้ดีกับข้อมูล ส่วนของ Mostinski นั้นจะให้ความถูกต้องที่เหมาะสมเมื่อค่าของฟลักซ์ความร้อนมีค่าสูง

ความขรุขระมีผลอย่างมากต่อการเดือดในช่วงของการเกิดฟองโดยเฉพาะที่ค่าความดันลดลงมีค่าต่ำ เส้นโค้งการเดือดจะมีแนวโน้มเคลื่อนตัวไปทางขวาเมื่อพื้นผิวมีสภาพเรียบกว่า ซึ่งความสัมพันธ์ทั้งสองที่กล่าวมาเบื้องต้นไม่ได้รวมค่าความขรุขระเข้าไปคิดด้วย อย่างไรก็ตามพวกเขาได้สร้างแบบจำลองของสมรรถนะในการเดือดบนท่อไว้เป็นอย่างดี ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการเดื่อนั้นอยู่ในช่วงที่ต้องพัฒนาขึ้นต่อไปเพราะว่าจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนั้นในช่วงก่อนหน้านี้ไม่เป็นที่ยอมรับในการประยุกต์ใช้ทั่วไป

### 3.2 การเพิ่มพื้นผิวในการเดือด (Enhanced boiling surfaces)

ปัจจัยที่สำคัญในการเดือดจะมีอยู่ 2 อย่างด้วยกันคือ การเกิดฟองในการเดือด และความหนาแน่นของตำแหน่งในการเดือด โดยที่การเกิดฟองนั้นจะมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากการเกิดขึ้นของมันเป็นสิ่งที่คุณควบคุม wall superheat, หรือฟลักซ์ความร้อน ซึ่งกระบวนการในการถ่ายเทความร้อนจะมีผลจากการพาความร้อนโดยธรรมชาติน้อยกว่าสภาวะการเดือดในอ่าง ส่วนความหนาแน่นของตำแหน่งการเดือดซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่มีการเดือดต่อหน่วยพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ง่ายเมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนมีค่าต่ำ และเมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตำแหน่งในการเดือดก็จะมากขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับการที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งทำให้การพัฒนาในด้านของพื้นผิวในการเดื่อนั้นจะพยายามให้เกิดการเดือดที่ค่า wall superheat ต่ำ เพื่อที่จะเพิ่มตำแหน่งในการเดือดมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งการใช้ครีบบจะเป็นการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยความยาวของท่อ ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการถ่ายเทความร้อนใน 1 สถานะ ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในการเดือดจะเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยความยาวของท่อ

### 3.2.1 ทฤษฎีการเกิดฟองในช่วงที่มีการเดือด (Boiling nucleation theory)



รูปที่ 3.6 การเกิดฟองของจุดไอที่ผิวของแข็ง

เริ่มมีการพัฒนาขึ้นในช่วงปีคริสต์ศักราช 1950 ซึ่งเป็นการศึกษาในส่วนของพื้นผิวการเดือดที่มีการปรับปรุง ซึ่ง Corty และ Foust (1955) และ Bankoff (1956, 1957, 1958) ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับการเริ่มเดือดจากการที่ไอถูกดักจับอยู่หลุมหรือรอยแยกบนผนังที่ร้อนก่อนที่จะหลุดออกจากผนัง Bankoff (1957) ได้แสดงการวิเคราะห์เกี่ยวกับพลังงานอิสระ, หรือการทำงานในการขึ้นรูป, ซึ่งต้องการเพื่อสร้างจุดฟองไอขึ้นที่พื้นผิวของแข็งที่ราบเรียบในของเหลวซึ่งน้อยกว่าความต้องการของการเกิดฟองที่อยู่ในสถานะของเหลวอย่างเดียว จากพื้นฐานของแบบจำลองทางกายภาพของเขา, ที่ได้ทำนายไว้ในรูปที่ 3.6 Bankoff ได้พิสูจน์ความต้องการพลังงานอิสระที่น้อยลงเมื่อต้องการเกิดจุดฟองขึ้นที่ผนังของแข็งซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดฟองเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวอย่างเดียว ดังนี้ :

$$\phi = \frac{2 + 2 \cos \beta + \cos \beta \sin^2 \beta}{4} \quad (3.10)$$

เมื่อพลังงานอิสระของโมลในการขึ้นรูปของฟองของของไหลบริสุทธิ์คือ

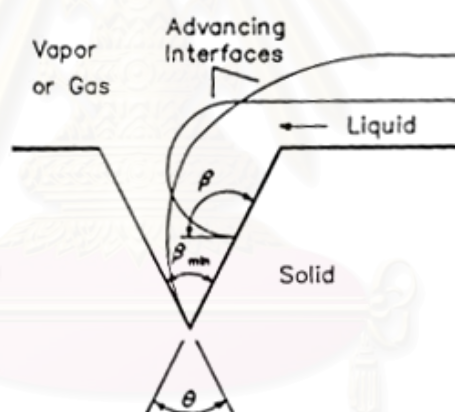
$$\Delta \tilde{g} = \frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3 \tilde{v}_g^2}{\Delta T_{\text{sat}}^2 (\Delta \tilde{h}_v / T_{\text{sat}})^2} \phi \quad (3.11)$$

โดยมุมสัมผัสคือมุมที่ผ่านของเหลวระหว่างหน้าประสานระหว่างของเหลว-ไอกับพื้นผิวของแข็งที่จุดสัมผัส โดยในตอนที่มีผู้เริ่มค้นคว้านั้นจะแสดงการเกิดฟองในการเดือดสำหรับของไหลพื้นฐาน, โดยใช้มุมสัมผัสในช่วง  $25^\circ$  ถึง  $90^\circ$  ซึ่งจะโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวให้ความ

ร้อนมากกว่ากลุ่มของเหลวที่เป็นไอตรง ในการศึกษาเพิ่มเติมนั้น, ทฤษฎีจะแสดงว่ามุมสัมผัสนั้น เป็นปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญมากในการเกิดฟองที่มีความแตกต่างกัน

### 3.2.2 กลไกการดักจับไอ (Vapor trapping mechanism)

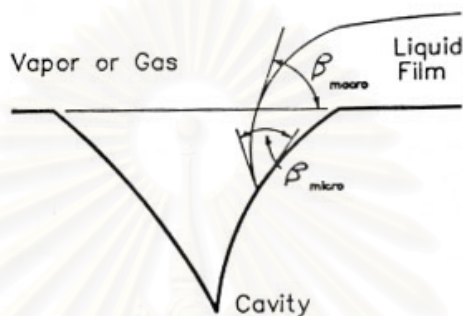
กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่ฟิล์มของเหลวของเหลวแพร่กระจายปกคลุมพื้นผิวที่มีร่องรอยขูดขีดและรูต่างๆ ซึ่งได้พิจารณาโดย Bankoff (1958) ได้ตั้งสมมติฐานว่าจุดฟองของไอหรือก๊าซที่ถูกดักจับบนผิวนั้นเป็นจุดเริ่มต้นในการเดือด, ซึ่งสนับสนุนโดยพื้นฐานของการเดือดที่ไม่มีการเคลื่อนไหวของ Harvey et al. (1944, 1945) ดังรูปที่ 3.7 Bankoff ได้ตั้งสมมติฐานว่ามุมสัมผัสมีค่าน้อยที่สุดเมื่อต้องการที่จะดักไอไว้ในร่อง ดังนั้นสภาวะหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อไอหรือก๊าซถูกดักจับคือมุมสัมผัส  $\beta$  จะต้องโตกว่ามุมรูปสามเหลี่ยม (Wedge angle)  $\theta$  .



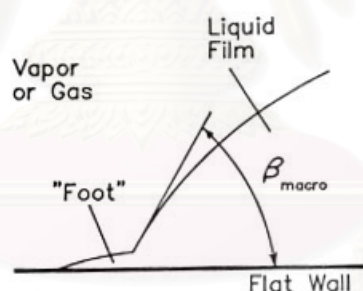
รูปที่ 3.7 ฟิล์มของเหลวที่อยู่บนร่องที่ถูกเติมไว้ด้วยก๊าซ

Clark, Streng และ Westwater (1959) ได้ยืนยันสมมติฐานนี้โดยได้ฉายภาพแบบความเร็วสูงของตำแหน่งการเกิดการเดือดโดยกล้องจุลทรรศน์ โดยสังเกตฟองที่ไหลออกมาจากรูและรอยต่างๆ บนผิว ซึ่งรูเหล่านี้จะมีขนาดของปากโพรงระหว่าง 10 ถึง 100 ไมโครเมตร และร่องรอยจะกว้างประมาณ 10 ไมโครเมตร Cornwell (1975, 1977) ได้ยืนยันอีกด้วยการสรุปการทดลองที่ได้จากการใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหาตำแหน่งที่เกิดการเดือด

อย่างไรก็ตามแบบจำลองของการดักจับไอของ Bankoff และที่ทฤษฎีที่สมบูรณ์กว่าของ Lorentz, Mikic, และ Rohsenow (1974) ซึ่งจะใช้ได้เพียงกับฟิล์มของเหลวที่บางเคลื่อนที่ช้าๆ ผ่านผิว ในทางปฏิบัติมีข้อยกเว้นจำนวนมากสำหรับสถานการณ์นี้ ตัวอย่างเช่นการดักจับไอเมื่อตำแหน่งการเดือดไม่เคลื่อนที่ที่จะแสดงกระบวนการที่มีความแตกต่างทางกายภาพนี้ได้อย่างสมบูรณ์



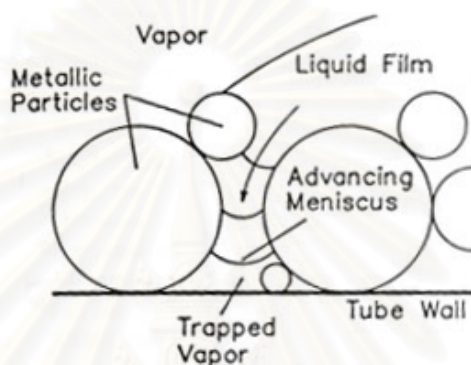
รูปที่ 3.8 ภาพขยายของมุมสัมผัส



รูปที่ 3.9 liquid "foot" ของฟิล์มของเหลวที่กระจายตัวอยู่

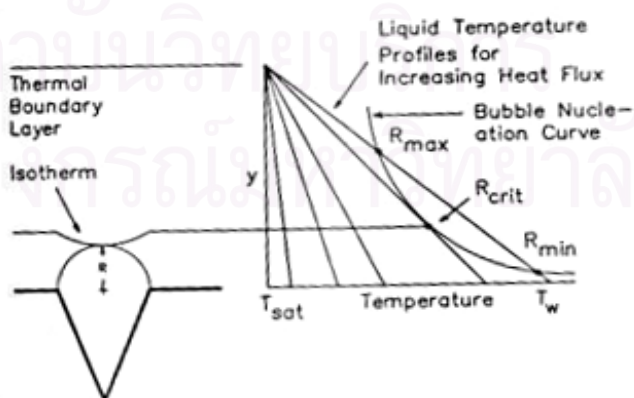
สำหรับของไหลจริงๆ กับพื้นผิว มุมสัมผัสจะมีค่าที่ไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ตามแนวของผิวและกับการไหลที่ริมของร่อง ในความเป็นจริงแล้วนั้นโดยปกติมุมสัมผัสจะถูกอ้างในการศึกษาการเกิดฟองในการเดือดซึ่งเป็นการศึกษาในระดับไมโครที่ได้จากภาพถ่ายที่ขยายใหญ่ ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงเพราะว่าพวกเขาได้แสดงความสัมพันธ์บนพื้นผิวที่ราบเรียบที่ผนังซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าที่ตำแหน่งที่เป็นการประสานกันเมื่อผิวใดๆ มีส่วนที่ราบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์บางส่วนที่ไม่สามารถเห็นได้กับมุมสัมผัสที่เล็กมากๆ โดย Chappius (1982) ได้อธิบายว่าที่ฟิล์มของเหลวนั้น

จะมีส่วนที่อยู่ต่ำสุดติดกับผิวซึ่งอยู่ที่ด้านบนของฟิล์มของเหลวที่กระจายอยู่บนผิวดังในรูปที่ 3.9 ส่วนรูปที่ 3.10 การดักจับของเหลวบนผิวที่ได้ถูกสมมติฐานไว้ซึ่งขึ้นกับการเคลื่อนที่ของของเหลวไปข้างหน้าเป็นรูปวงเดือน (Meniscus) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของรูปทรงที่เคลื่อนผ่าน, แรงคาพิลลารี, แรงลอยตัวของไอ, และหน้าประสานของของแข็ง-ของเหลว-ไอ



รูปที่ 3.10 ลักษณะของเหลวที่อยู่บนพื้นผิวขรุขระในอุดมคติ

### 3.2.3 การเกิดฟองในการเดือดในชั้นขอบเขตของความร้อน (Boiling nucleation in a thermal boundary layer)



รูปที่ 3.11 การเกิดการเดือดในชั้นขอบเขตของความร้อน

การเกิดฟองที่ผนังที่ร้อนกับกลุ่มของเหลวที่ถูกทำให้เดือดมากกว่าการให้ความร้อนที่คงที่ ซึ่งมีผลต่อการแดงในชั้นขอบเขตความร้อน Hsu (1962) ได้ใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Hsu และ Graham (1961) ที่ได้พัฒนาจากทฤษฎีการเกิดฟองสำหรับจุดฟองที่อยู่บริเวณปากท่อและอยู่ในขอบเขตความร้อนภายในของเหลวที่อยู่ติดกับผนังโดยมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นที่ละชั้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.11 เมื่ออุณหภูมิมีลักษณะการกระจายเป็นเส้นตรง, โดยไฮโดรเจนที่อยู่ในชั้นของเหลวที่อยู่ด้านบนของจุดฟองบางจุดอาจจะมีค่าสูงกว่า bubble nucleation superheat ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$\Delta T_{\text{sat}} = \frac{2\sigma}{R(dP/dT)_{\text{sat}}} \quad (3.11)$$

โดย  $R$  คือ รัศมีความโค้งของหน้าประสานระหว่างของเหลว-ไอ

ที่จุดนี้จะเป็นจุดที่จุดฟองไอเริ่มโตขึ้นและจะเป็นจุดที่เริ่มการเดือด ทั้งจุดฟองที่เล็กมากและใหญ่มาก (เมื่อมีการแยกชั้นความร้อนจากตำแหน่งการเดือดอื่นๆ) จะไม่ถูกกระตุ้นเพราะตำแหน่งที่เกิดไฮโดรเจน ที่เกี่ยวข้องที่สลายไม่สามารถใช้กับสมการที่ (3.11) ได้ เพราะสิ่งที่ Hsu (1962) ได้แสดงเอาไว้ไม่เพียงพอสำหรับการดักจับไอหรือก๊าซที่อยู่ในรูที่เตรียมจะขยายตัวเป็นฟองต่อไปไม่ว่าจะเป็นผิวเรียบหรือผิวที่มีการปรับปรุงในการเดือดก็ตามแต่  $R$  จะต้องอยู่ภายในช่วงที่กำหนดเอาไว้ซึ่งขึ้นกับเกรดเดียนท์ของอุณหภูมิในของเหลว

แม้ว่าทฤษฎีของ Hsu (1962) จะมีประโยชน์ต่อการทำความเข้าใจผลกระทบของการกระจายตัวของอุณหภูมิแบบชั่วขณะในการเกิดฟอง, หลายๆ ข้อจำกัดของสันนิษฐานในทฤษฎีนั้นจะมีผลก็ต่อเมื่อจุดฟองที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนั้นจะสมมติว่าไม่มีความเสถียร, ของเหลวมีการเดือดอย่างสม่ำเสมอและอยู่ในชั้นขอบเขตความร้อนจนกระทั่งมีการเกิดฟอง และจุดฟองจะมีความเสถียรเมื่ออยู่ในของเหลวที่มีการเดือดที่สม่ำเสมอ (หรือเป็นของเหลวไม่อิมิตัว) ซึ่งรูเหล่านั้นสามารถบรรจุจุดฟองเอาไว้ได้

### 3.2.4 ความหนาแน่นของตำแหน่งการเดือด (Boiling site density)

Kurihari และ Myers (1960) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของตำแหน่งที่มีการเดือดกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะที่มีการเดือดของน้ำและของไหล



อินทรีย์หลายชนิดที่เดือดบนผิวทองแดงที่ขรุขระและกระดาศทราย โดยใช้ขนาดของเม็ดทรายที่มีเท่าๆ กัน โดยสังเกตผลของความขรุขระของพื้นผิวที่มีต่อความหนาแน่นในการเดือดซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการเดือดจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นและการเดือดก็มีความหนาแน่นมากขึ้นสอดคล้องกันด้วย ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha \propto (N/A)^{0.43} \quad (3.12)$$

ทั้งนี้พวกเขาได้สรุปว่าการเพิ่มของตำแหน่งที่มีการเดือดนั้นจะทำให้สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

### 3.3 การหุ้มผิวขรุขระ (Porous coatings)

#### 3.3.1 ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนสูงเริ่มต้น (Original high heat flux correlation)

Gottzmann, Wolf, และ O'Neill (1971) ได้สร้างแบบจำลองขึ้นมาโดยให้ความสำคัญในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการเดือดบนผิวเรียบที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นของรูต่างๆ ที่อยู่ในชั้นผิวขรุขระ โดยตั้งอยู่บนปัจจัยสองอย่างคือ Nucleation superheat และกลไกการระเหยของแผ่นฟิล์มบาง (โดยผลของการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นในการเดือดในกระบวนการพาความร้อนจากภายนอก) โดย Wall superheat ระหว่างผนังกับของเหลวอิมิตัวที่ล้อมรอบซึ่งสมมติให้เป็นผลรวมของความต้านทานทางความร้อนปัจจัยทั้งสอง ดังนั้นจะได้ว่า Wall superheat คือ

$$\Delta T = \Delta T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{film}} \quad (3.13)$$

เมื่อ Nucleation superheat คือ

$$\Delta T_{\text{sat}} = \frac{2\sigma}{R(dP/dT)_{\text{sat}}} \quad (3.14)$$

โดย R คือ รัศมีของจุดฟองไอ



อุณหภูมิที่ต่ำลงระหว่างแผ่นฟิล์มของของเหลวที่กำลังระเหยคือ

$$\Delta T_{\text{film}} = \frac{BqR^2}{k_L} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $B$  คือ Empirical geometry factor ที่รวมถึงความหนาของฟิล์มและพื้นที่ผิว,  $q$  คือ ฟลักซ์ความร้อนที่อยู่ภายนอกพื้นผิวของชั้นผิวขรุขระ จากสมการที่ (3.15) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสภาพนำความร้อนผ่านชั้นของเหลวที่ไม่เคลื่อนที่ที่มีความหนา  $\delta$  คือ

$$\alpha_{\text{film}} = \frac{k_L}{\delta} \quad (3.16)$$

เมื่อเขียนใหม่จะได้สมการที่ (3.14) เป็น

$$\Delta T_{\text{film}} = \frac{q\delta}{k_L} \quad (3.17)$$

ซึ่งชั้นผิวขรุขระและความหนาของฟิล์มมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\delta = BR^2 \quad (3.18)$$

เมื่อ  $R$  คือ รัศมีเฉลี่ยของรูที่อยู่ในชั้นผิวขรุขระ ค่าของฟลักซ์ความร้อนจะแสดงด้วยพื้นที่ของผิวมากกว่าที่แสดงในรูปของพื้นที่ของผิวที่เปียกในชั้นของผิวขรุขระซึ่งเราไม่ทราบค่า ดังนั้น Wall superheat ของการเดือดบนพื้นผิวที่มีชั้นผิวขรุขระบางๆ คือ

$$\Delta T = \frac{2\sigma}{R(dP/dT)_{\text{sat}}} + \frac{BqR^2}{k_L} \quad (3.19)$$

ค่าของรัศมีของรูสำหรับของเหลวแต่ละชนิดที่เหมาะสม  $R^*$  สามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 19 เมื่อค่า Wall superheat มีค่าน้อยที่สุดจะได้

$$R^* = \left[ \frac{\sigma k_L}{Bq(dP/dT)_{\text{sat}}} \right]^{1/3} \quad (3.20)$$

แล้วนำค่า  $R^*$  ที่ได้แทนลงในสมการที่ (19) ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการเดือดสูงสุด คือ

$$\alpha_{\text{max}} = \frac{1}{3B^{1/3}} \left[ \frac{k_L (dP/dT)_{\text{sat}}^2}{\sigma^2} \right]^{1/3} q^{2/3} \quad (3.21)$$

ซึ่งสมการที่ได้มานำไปใช้กับของไหล 10 ชนิดที่ค่าฟลักซ์ความร้อนภายใต้ความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศและที่ความดันบรรยากาศ, ค่า  $B$  จะหาจากวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least-squares) กับสมการที่ (3.21) จากข้อมูลที่เก็บมาจะได้ความสัมพันธ์คือ

$$\alpha_{\text{max}} = 0.0421 \left[ \frac{k_L (dP/dT)_{\text{sat}}^2}{\sigma^2} \right]^{1/3} q^{2/3} \quad (3.22)$$

ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลโดยส่วนมากแต่มีบางกรณีที่ยังไม่สามารถทำนายผลได้เช่นแอมโมเนียโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเกินจริงเมื่อค่า Wall superheat มีค่า 1.0 K หรือน้อยกว่า

### 3.3.2 ความสัมพันธ์ของ High flux แบบใหม่

โดย Gottzmann, Terbot, และ O'Neill (1972) ได้ปรับปรุงแบบจำลองที่ผ่านมาโดยเพื่อให้มีผลของรูปทรงผิวขรุขระในกระบวนการระเหยของแผ่นฟิล์มที่ดีกว่า โดยเริ่มจากสมมติฐานของความต้านทานสองอย่างคือให้ Wall superheat เท่ากับผลรวมของอุณหภูมิแตกต่างที่ข้ามฟิล์มของเหลวและ boiling nucleation superheat ดังนี้

$$\Delta T = (T_w - T_{\text{sat}}) = (T_w - T_1) + (T_1 - T_{\text{sat}}) \quad (3.23)$$

เมื่อ  $T_1$  คือ อุณหภูมิที่หน้าประสานของฟิล์มของเหลว โดย boiling nucleation superheat ระหว่างรอยเชื่อมต่อของไอ-ของเหลวและของเหลวอิมัตวหาได้จากสมการที่ (3.14) และอุณหภูมิที่

ตกลงผ่านฟิล์มของเหลวหาจากการนำความร้อน 1 มิติโดยไม่คิดการพาความร้อนในฟิล์มของเหลว และค่าฟลักซ์ความร้อนจะกลายเป็น

$$q = \left( \frac{S}{A} \right) \left( \frac{k_L}{\delta} \right) (T_w - T_l) \quad (3.24)$$

เมื่อ  $S$  คือ พื้นที่ผิวของฟิล์มของเหลว,  $A$  คือ พื้นที่ผิวของชั้นผิวขรุขระ และ  $\delta$  คือ ความหนาของฟิล์มของเหลว โดยให้อุณหภูมิของอนุภาคของชั้นผิวขรุขระมีความสม่ำเสมอและเท่ากันเป็นหลัก ปริมาตรของชั้นผิวขรุขระทั้งหมด  $V$  คือ

$$V = A\delta_p \quad (3.25)$$

เมื่อ  $\delta_p$  คือ ความหนาของชั้นผิวขรุขระ แทนค่า  $A$  ลงในสมการที่ (3.24) จะเป็น

$$T_w - T_l = \left( \frac{q}{k_L} \right) \left( \frac{\delta V}{\delta_p S} \right) \quad (3.26)$$

โดยเทอมของ  $(\delta V / \delta_p S)$  เป็น Geometry factor ของแผ่นฟิล์มของเหลวในชั้นผิวขรุขระ ซึ่งจะได้ค่าของ Geometry factor ใหม่  $B$  คือ

$$B = \frac{\delta V}{\delta_p S R^2} \quad (3.27)$$

เมื่อแทนค่า  $B$  ลงในสมการที่ (3.26) จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3.17) โดย  $B$  จะขึ้นกับรูปทรงของชั้นผิวขรุขระซึ่งจากกราฟของ Webb (1983) จะสามารถคำนวณค่าของ  $Bt_p$  ได้เท่ากับ 1.04 เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีของรู  $R$  ต่อรัศมีของอนุภาค  $R_p$  เท่ากับ 0.414 เมื่อค่าความพรุนเท่ากับ 47.6 % ซึ่ง Wall superheat สำหรับพื้นผิวที่มีชั้นผิวขรุขระจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_w - T_{sat} = \frac{0.045qd_p^2}{k_L \delta_p} + \frac{9.66\sigma}{d_p (dP/dT)_{sat}} \quad (3.28)$$

เมื่อ  $d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค

ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ทำนายได้เป็นบางส่วนเท่านั้น โดยจะพบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของเหลวแล้วจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกันออกไป

### 3.3.2.1 ความสัมพันธ์จากการทดลองของ Nishikawa และ Ito

Nishikawa และ Ito (1982) ได้หาความสัมพันธ์ที่สมบูรณ์ของการเดือดบนชั้นผิวขรุขระ ซึ่งมาจากการทดลองบนชั้นผิวขรุขระของอนุภาคทองแดงและทองเหลืองที่มีขนาดสม่ำเสมอโดยเปลี่ยนไปหลายๆ ขนาดและความหนาที่แตกต่างกัน โดยทดลองกับสารทำความเย็น R-11, R-113, และเบนซินที่ความดันบรรยากาศ และใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นกับข้อมูลที่ได้มา โดยเลือกคุณสมบัติทางกายภาพและชั้นผิวขรุขระหลายๆ รูปแบบ (เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค, ความหนาของชั้นผิวขรุขระ, ค่าความผิวขรุขระ) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{q\delta_p}{k_m(T_w - T_{sat})} = 0.639 \left( \frac{\sigma^2 \Delta h_v}{q^2 \delta_p^2} \right)^{0.0658} \left( \frac{\delta_p}{d_p} \right)^{0.626} \left( \frac{qd_p}{\varepsilon \Delta h_v \mu_v} \right)^{0.665} \left( \frac{k_m}{k_L} \right)^{-0.692} \left( \frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{0.904} \quad (3.29)$$

เมื่อค่าสภาพนำความร้อนของชั้นผิวขรุขระ คือ

$$k_m = \varepsilon k_L + (1 - \varepsilon) k_p \quad (3.30)$$

ที่ด้านซ้ายของสมการที่ (3.29) คือค่า Nusselt number ที่ได้จากชั้นความหนาของผิวขรุขระ  $\delta_p$ , เทอมที่ 3 ทางด้านขวาของสมการจะเป็น Reynolds number ในสถานะที่เป็นไอ ที่ได้ จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  $d_p$  และเนื่องจากความสัมพันธ์นี้ได้รวมผลของการพาความร้อนในกระบวนการเดือดเข้าไปด้วย ดังนั้นช่วงของการใช้งานของความสัมพันธ์นี้จึงมีดังนี้

$$\begin{aligned} 0.1 &\leq d_p \leq 1.0 \quad (\text{in mm.}) \\ 1.6 &< \delta_p / d_p < 20 \\ 0.38 &< \varepsilon < 0.71 \\ 61 &< k_p < 372 \quad \left( \text{in } \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

ข้อมูลของความสัมพันธ์นี้ได้มาจากการทดลองกับของไหล 3 ชนิดที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อใช้กับของไหลที่แตกต่างออกหรือที่ความดันอื่นๆ ซึ่งจะมีทำให้ความสัมพันธ์นี้มีผลกระทบอย่างมากกับค่าสภาพนำความร้อนของอนุภาคโลหะ โดยค่าสภาพนำความร้อนของทองแดงจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในเนื้อโลหะ, และผงที่พ่นในการสร้างชั้นผิวขรุขระ

### 3.3.2.2 ความสัมพันธ์จากการทดลองของ Rudemiller และ Lindsay (1990)

ความสัมพันธ์นี้จะใช้กับการทำพื้นผิวให้ขรุขระโดยกรรมวิธีพ่นพลาสติกมาและเปลวไฟ โดยความสัมพันธ์นี้มีการแบ่งเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ดังนี้ Reynolds number (Re), Jakob number (Ja), Constant heat flux number ( $N_{cf}$ ) และปัจจัยทางด้านรูปร่าง ( $\lambda$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันนี้

$$Ja = 0.137[Re]^{0.292} [\lambda]^{-0.190} [N_{cf}]^{0.065} \quad (3.32)$$

โดย

$$Re = \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \quad (3.33)$$

$$Ja = \frac{C_{pL} \Delta T}{\Delta h_v} \quad (3.34)$$

$$N_{cf} = \frac{\mu_L^2}{\eta \rho_L \sigma} \quad (3.35)$$

$$\lambda = \frac{\eta}{\delta} \quad (3.36)$$

โดยที่

$\delta$  = ความหนาของชั้นผิวขรุขระ

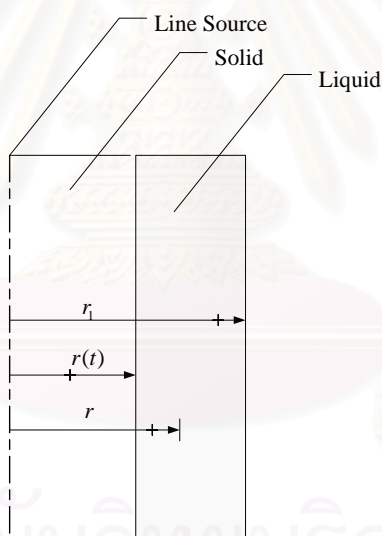
$\eta$  = ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนบนผิวขรุขระ

และมีข้อจำกัด ดังนี้

$$\begin{aligned}
 6.909 \times 10^{-5} &\leq \text{Re} \leq 1.899 \times 10^{-1} \\
 6.667 \times 10^{-3} &\leq \lambda \leq 1.667 \times 10^{-1} \\
 7.773 \times 10^{-4} &\leq N_{cf} \leq 4.787 \times 10^{-3}
 \end{aligned}
 \tag{3.37}$$

### 3.4 ปัญหาของการแข็งตัวภายนอกทรงแบบทรงกระบอก

ปัญหานี้จะเป็นการแข็งตัวของน้ำแข็งรอบๆภายนอกท่อทรงกระบอก โดยจะทำการพิจารณาที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว ที่ระยะรัศมี  $r = r(t)$  โดยที่ระยะขอบเขต  $r > r(t)$  จะบรรจุของเหลวไว้ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้  $\rho_2, c_2, k_2$  และ โดยที่ระยะขอบเขต  $r < r(t)$  จะบรรจุของแข็งไว้ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้  $\rho_1, c_1, k_1$  ดังรูปที่ 3.12 โดยถ้า เป็นค่าอุณหภูมิในขอบเขตทั้ง 2 โดยที่มีค่า  $T_f$  เป็นค่าอุณหภูมิของการแข็งตัว, โดยมีค่าสภาวะขอบเขตดังนี้



รูปที่ 3.12 แสดงปัญหาของการแข็งตัวภายนอกทรงแบบทรงกระบอก

- ที่  $r = r(t)$  คือ

$$T_1 = T_2 = T_f \tag{3.38}$$

$$T_1 = T_f \frac{\ln\left[\frac{r}{r(t)}\right]}{\ln\left[\frac{r_1}{r(t)}\right]} \quad r(t) < r < r_1 \quad (3.39)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \rho L \frac{dr(t)}{dt} \quad (3.40)$$

- ที่  $r < r_1$  โดยที่ของเหลวมีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_f$  โดยที่  $r = r_1$  จะมีค่าอุณหภูมิคงที่ที่ zero temperature เมื่อ  $t > 0$

เมื่อทำการแทนค่าสมการที่ (3.39) เข้าไปในสมการที่ (3.40) จะได้ว่า

$$\frac{k_1 T_f}{\rho L} dt = r(t) \ln\left[\frac{r_1}{r(t)}\right] dr(t) \quad (3.41)$$

จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการที่ (3.41) เมื่อเวลา 0 ถึง t และที่  $r(t)$  ถึง  $r_1$  แล้วจะได้

$$[r(t)]^2 \ln\left[\frac{r_1}{r(t)}\right] + \frac{[r(t)]^2 + r_1^2}{2} = \frac{2k_1 T_f t}{\rho L} \quad (3.42)$$

โดยที่สมการที่ (3.42) นี้ เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำนายความหนาของชั้นน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆได้นั่นเอง

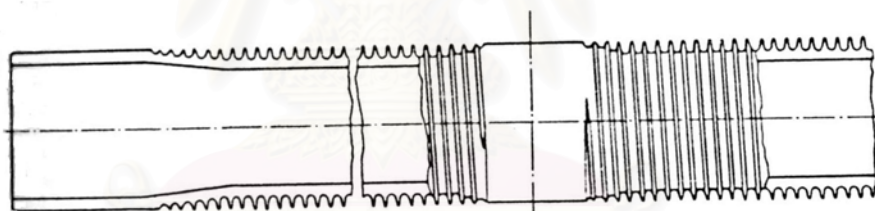
### 3.5 ประเภทของท่อเพิ่มการเดือดในเชิงพาณิชย์

มีประเภทของท่อเพิ่มการเดือดจำนวนมากที่ได้ถูกมาใช้ในการพาณิชย์สำหรับการเดือดของด้านของเปลือกและการเดือดภายในท่อ หลายๆรูปแบบสำหรับการเพิ่มการเดือดสำหรับของไหลที่ถูกทำให้ร้อน โดยการเพิ่มการเดือดได้มารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ ท่อที่มีครีบนอก, ท่อที่มีการปรับปรุงลักษณะครีบนอก, ท่อที่หุ้มด้วยชั้นฉนวน, ท่อที่มีครีบบน, ท่อที่มีการเพิ่มการเดือดทั้ง 2 ด้าน และท่อที่มีการสร้างท่อไว้ภายใน

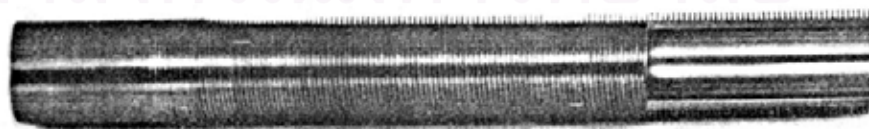


### 3.5.1 ท่อที่มีครีบบนภายนอก

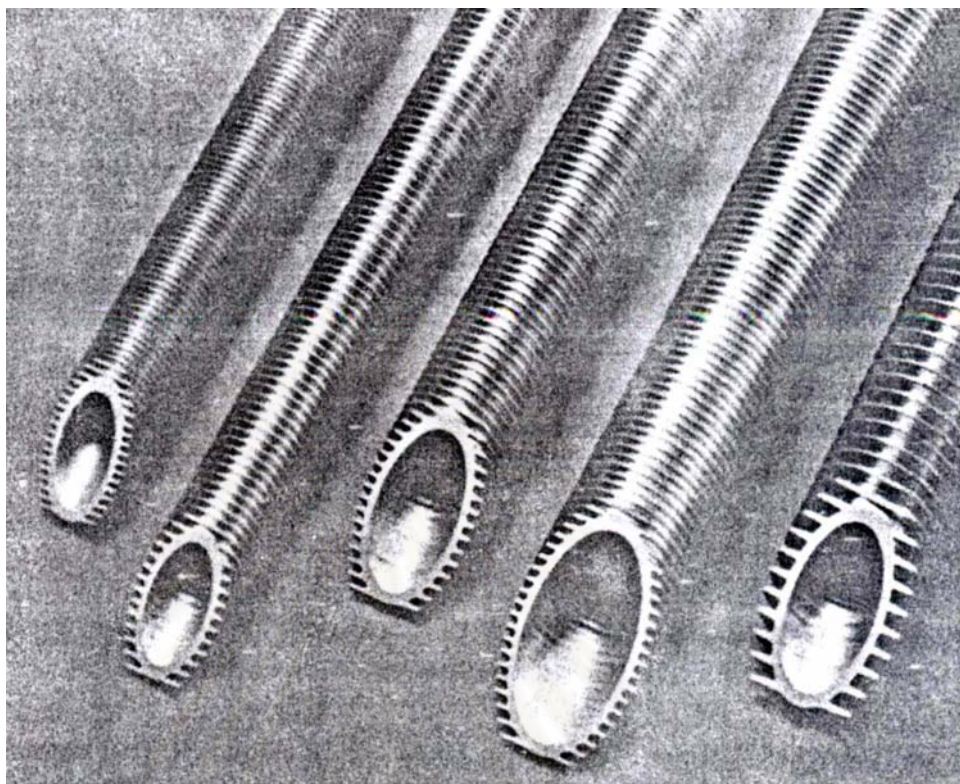
ท่อประเภทนี้ในการผลิตจะมีความหลากหลายในด้านของความหนาแน่นของครีบ, ลักษณะ และความสูง แต่เฉพาะท่อความสูงของครีบต่ำที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มการเดือดเท่านั้น เพราะว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขนาดหลายๆของครีบที่มีความสูงขนาดกลางและสูงนั้นจะให้ค่าประสิทธิภาพของครีบที่ต่ำจนยอมรับไม่ได้ ครีบบนภายนอกซึ่งถูกเชื่อมหลอมติดที่ผิวภายนอกของท่อจะไม่ถูกนำมาใช้ในงานประเภทนี้ และท่อที่มีครีบที่มีลักษณะการวางตัวตามยาวนั้นจะใช้ในงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีท่อแบบ 2 ด้านเท่านั้น สำหรับท่อที่มีครีบต่ำจะนำมาใช้เป็นเพิ่มการเดือดเนื่องจากจะทำความร้อนต่อหน่วยความยาวได้สูงกว่าท่อแบบเรียบ โดยลักษณะพื้นฐานของท่อที่มีครีบต่ำได้แก่ (1) จะมีปลายที่เรียบ; (2) ขอบเขตของส่วนที่มีครีบจะเริ่มสูงขึ้นในขณะส่วนที่มีขนาดของท่อเริ่มลดลง; (3) ส่วนของครีบจะมีลักษณะเป็นเกลียวโดยมีผนังท่อที่บางภายใต้ครีบ; และ (4) ส่วนของพื้นผิวที่เรียบจะเป็นส่วนที่ใช้ในการสกัดกั้น ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.13 แผนภาพของท่อที่มีครีบต่ำ



รูปที่ 3.14 ท่อ S/T Trufin (courtesy Wolverine Tube)

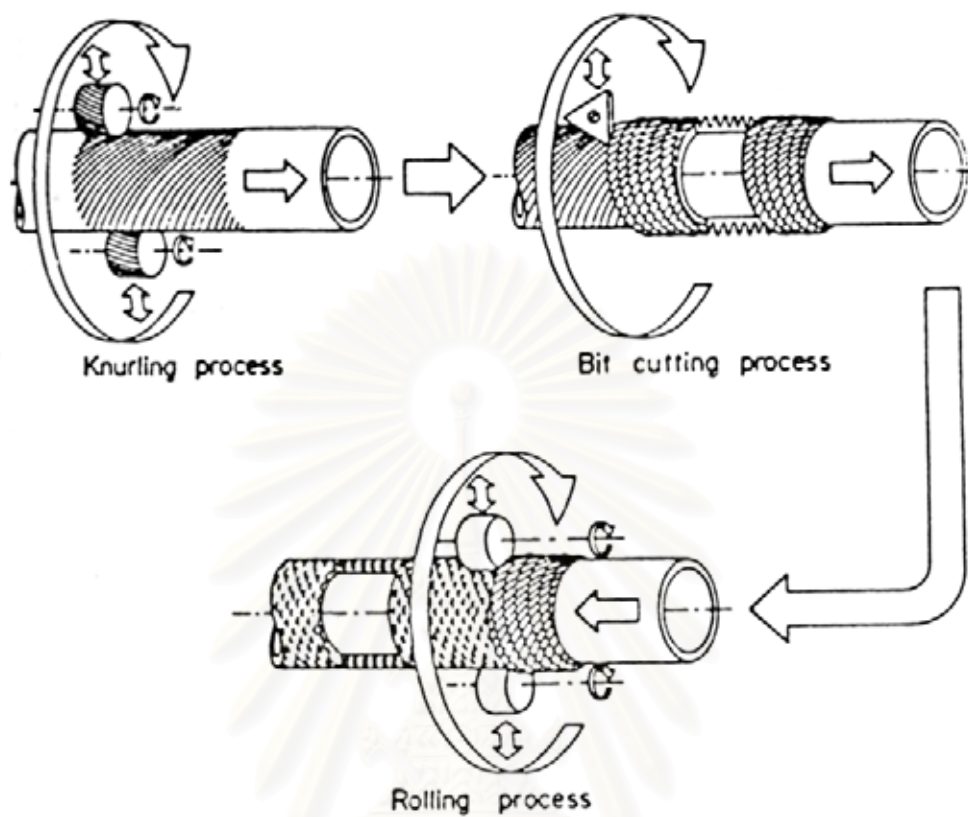


รูปที่ 3.15 ท่อที่ครีบท่ำและกลาง (courtesy Hitachi)

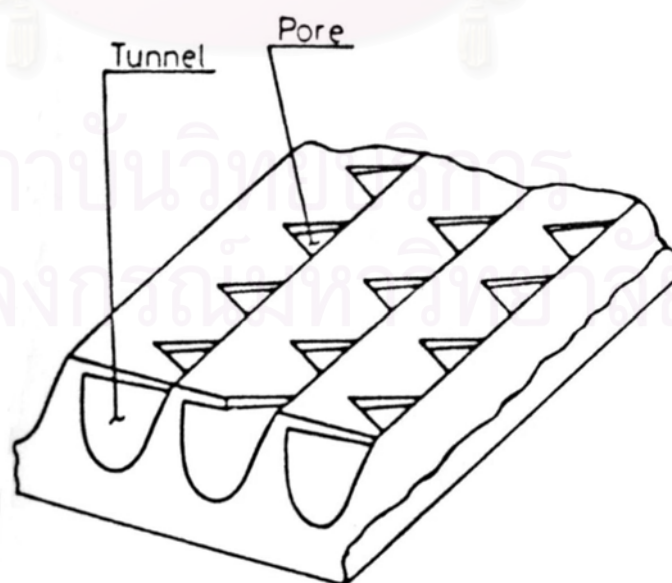
### 3.5.2 ท่อที่มีการปรับปรุงลักษณะครีบบนภายนอก

ท่อประเภทนี้เป็นการพัฒนาท่อที่มีครีบท่ำโดยการกัด, การกลิ้งบนลูกกลิ้ง, หรือการอบด เพื่อสร้างรูปแบบของครีบที่มีความซับซ้อนและสมรรถภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นกว่าเดิม

กระบวนการผลิตท่อประเภทนี้จะเริ่มจากการนำท่อผิวเรียบมาทำการกลิ้งบนลูกกลิ้งเพื่อสร้างครีบที่ละเอียดและทำการกัดและกลิ้งบนลูกกลิ้งเพื่อให้ได้ครีบที่มีลักษณะใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตท่อ Thermoexcel-E ของ Hitachi ดังรูปที่ 3.16, 3.17 และ 3.18

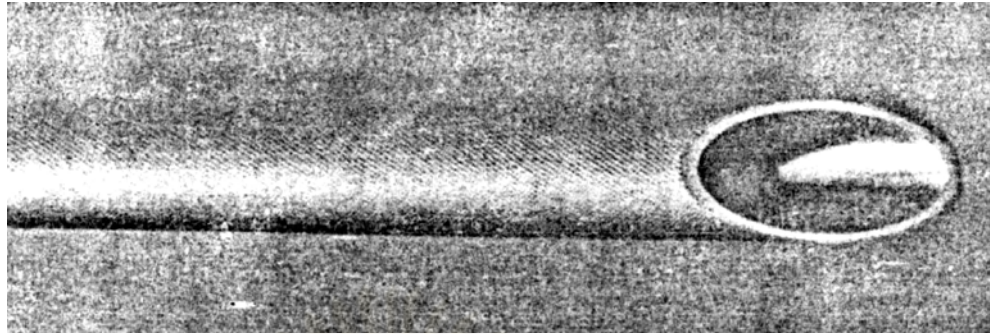


รูปที่ 3.16 กระบวนการของงานโลหะสำหรับท่อ Thermoexcel-E



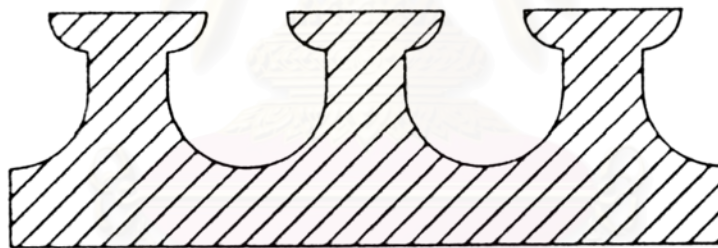
รูปที่ 3.17 แผนภาพของท่อ Thermoexcel-E



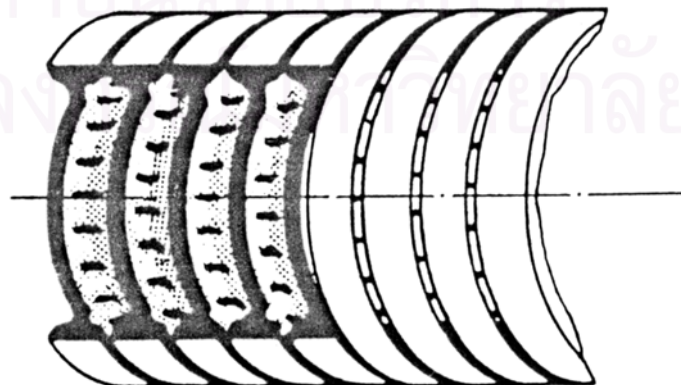


รูปที่ 3.18 รูปถ่ายท่อ Thermoexcel-E (courtesy Hitachi)

ส่วนท่อ Gewa-T (ดังรูปที่ 4) ที่ผลิตโดย Wieland Werke โดยท่อชนิดนี้เป็นการแยกท่อที่มีครีบท่าโดยการสอดเข้าไปรูปร่างตัววาง แล้วทำการหมุนซึ่งจะทำให้ได้ครีบท่าที่มีรูปร่างเป็นตัวที่ละมีขนาดของช่องว่างระหว่างปลายครีบท่าที่สม่ำเสมอ โดยที่ทางเข้าจะเป็นแนวรูปตัวที่ตลอดแนวเส้นรอบวงของท่อ และได้มีการพัฒนา Gewa-T ขึ้นเป็น Gewa-TX โดยมีการเพิ่มรอยบากเข้าไปภายในช่องของท่อ ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20

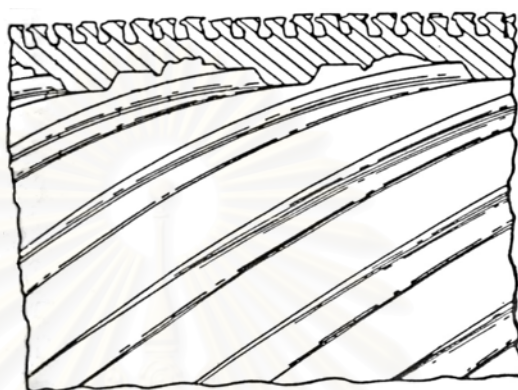


รูปที่ 3.19 ท่อ Gewa-T

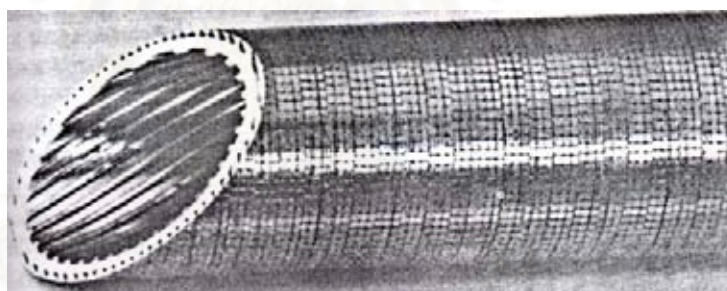


รูปที่ 3.20 ท่อ Gewa-TX (courtesy Weiland-Werke)

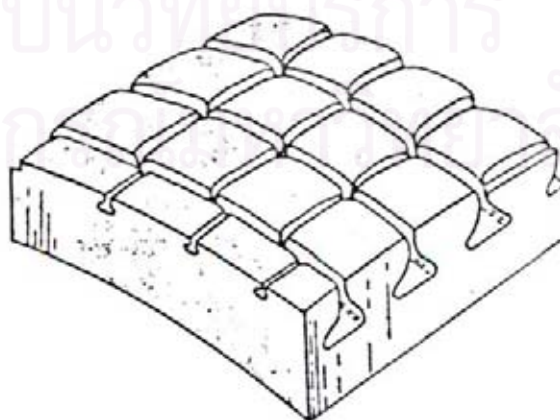
การตัดครีปในแนวทแยงมุมจะทำให้ตัวของครีปมีลักษณะคล้ายโคนดอกเห็ด โดยที่ทางเข้าของรูต่างๆจะสร้างให้มีลักษณะเป็นรอยสี่เหลี่ยม โดยที่มีท่อลักษณะดังกล่าวคือ Turbo-B และ ECR-40 ดังรูปที่ 3.21, 3.22 และ 3.23



รูปที่ 3.21 ภาพตัดขวางของท่อ Turbo-B (courtesy Wolverine Tube)



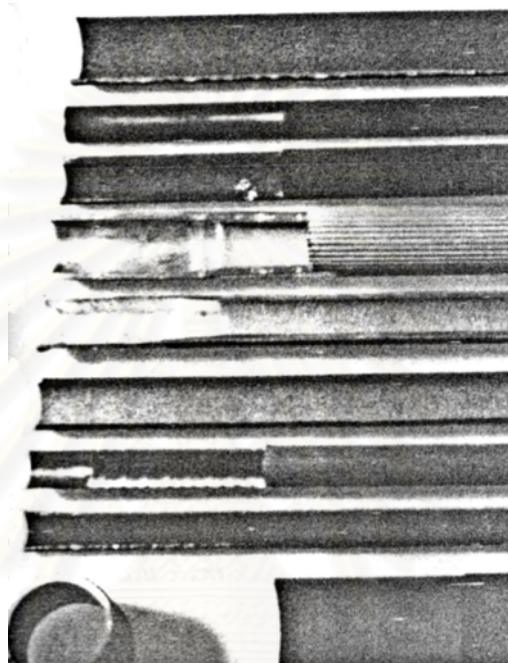
รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายของท่อ Turbo-B (courtesy Wolverine Tube)



รูปที่ 3.23 ท่อ ECR-40

### 3.5.3 ท่อที่หุ้มด้วยชั้นผิวขรุขระ

ท่อชนิดนี้ผลิตเทคนิคการพ่นเปลวไฟหรืออนุภาคต่างๆลงบนพื้นผิวของตัวท่อ หรือนำท่อไปชุบด้วยผงต่างๆให้ติดที่ตัวท่อ และการนำท่อไปบดกับพื้นผิวของเหล็กเพื่อให้เกิดเป็นผิวขรุขระ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ลักษณะของท่อ High Flux (courtesy Union Carbide)

### 3.5.4 ท่อที่มีครีบบภายใน

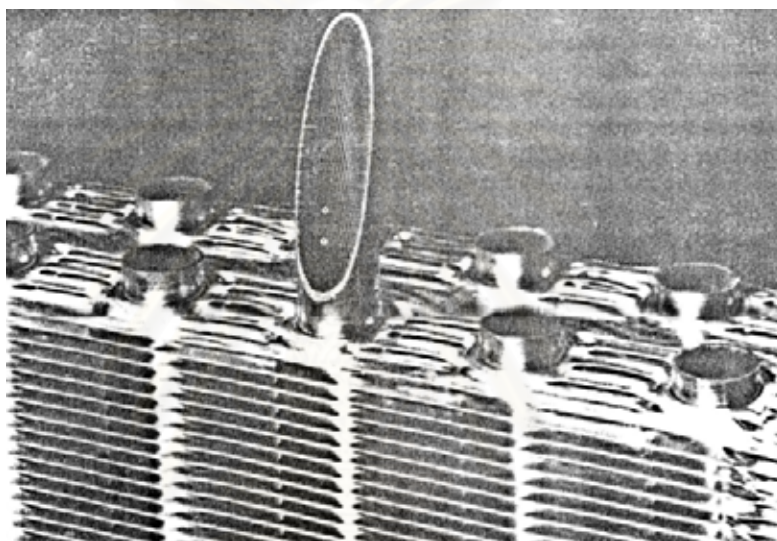
ท่อประเภทนี้เกือบทั้งหมดจะถูกสร้างมาเพื่อใช้กับการไหลในสถานะเดียว แต่ก็มีบ้างที่นำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านการเดือด รูปที่ 3.25 จะแสดงรูปร่างต่างๆของครีบบที่อยู่ภายในท่อของ Hitachi



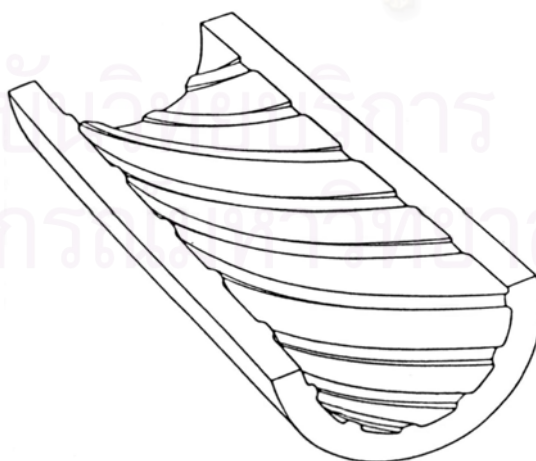
รูปที่ 3.25 ท่อ Thermofin A, B, EX, และ HEX

### 3.5.5 ท่อที่มีการเพิ่มการเดือดทั้ง 2 ด้าน

ท่อประเภทนี้จะช่วยในการตัดสินใจในทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม เมื่อมีการเดือดที่ผิวภายนอก จะมีการปรับปรุงท่อที่ผิวด้านในในด้านตามยาวหรือทำให้มีลักษณะเป็นเกลียว ท่อ Gewa-TX ที่การทำผิวด้านในให้มีลักษณะเป็นเกลียว จะเรียกว่า Gewa-TXC ส่วนท่อ Thermoexcel ที่มีการทำในลักษณะเดียวกันจะเรียกว่า Thermoexcel-HEC

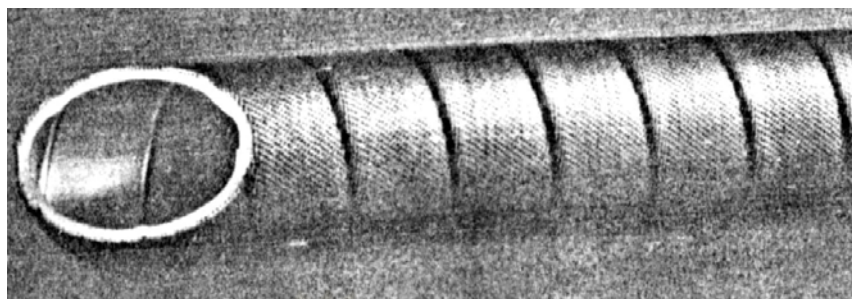


รูปที่ 3.26 ท่อ Thermofin-EX ในชุดแลกเปลี่ยนความร้อนอะลูมิเนียม (courtesy Hitachi)



รูปที่ 3.27 ท่อที่มีการรีวแนวภายในท่อ ของ Babcock และ Wilcox





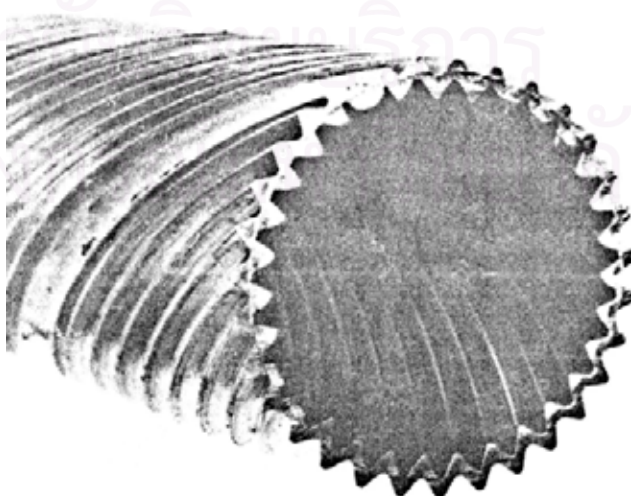
รูปที่ 3.28 ท่อ Thermoexcel-HEC (courtesy Hitachi)

ท่อ S/T Turbo-Chil ของ Wolverine Tubes จะมีการสร้างเกลียวเล็กๆภายในท่อ ดังรูปที่ 3.29 และในรูปแบบเดียวกันที่ผิวภายนอกจะเรียกว่าท่อ S/T Trufin



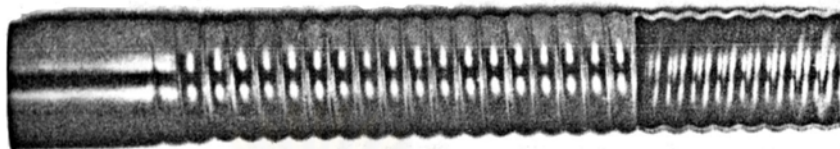
รูปที่ 3.29 ท่อ S/T Turbo-Chil (courtesy Wolverine Tubes)

การปรับปรุงท่อในทั้งสองด้านแบบนี้จะเป็นเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผนังท่อเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนในทั้งด้านในและด้านนอก เช่น ท่อที่มีเกลียวของ GA Technologies ดังรูปที่ 3.30

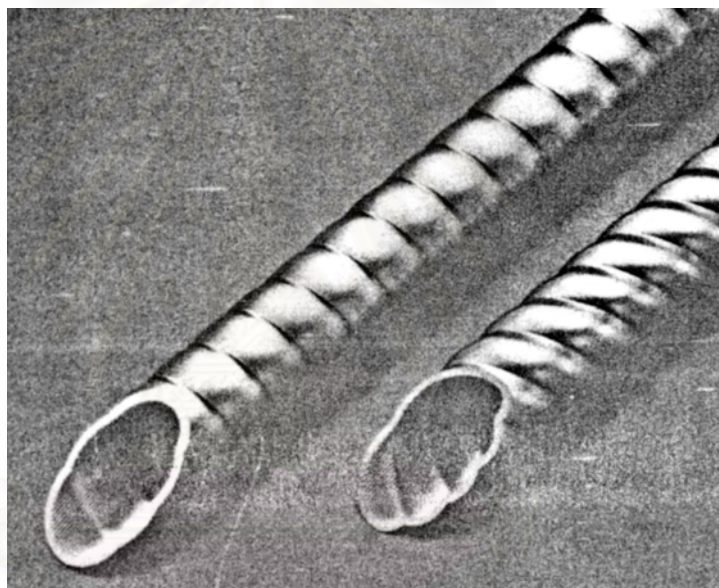


รูปที่ 3.30 ท่อที่มีเกลียวของ GA Technologies

ส่วนท่ออีกประเภทหนึ่งคือท่อที่มีการทำให้ท่อมีการย่นเป็นลูกคลื่น ดังรูปที่ 3.31 โดยวิธีการนี้จะใช้กับท่อที่ผนังท่อบางๆ ได้ด้วย



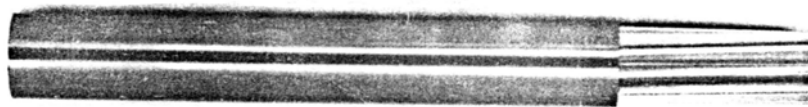
รูปที่ 3.31 ท่อมีการย่นเป็นลูกคลื่น (courtesy Wolverine Tubes)



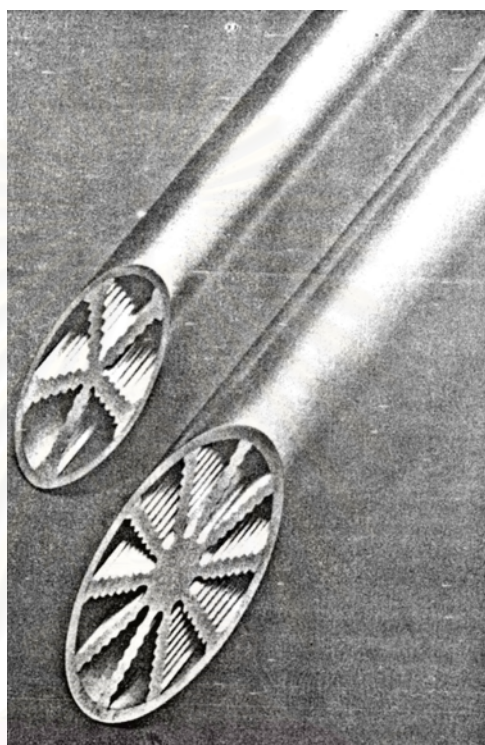
รูปที่ 3.32 ท่อ Thermofin-CR (courtesy Hitachi)

### 3.5.6 ท่อที่มีการสร้างท่อไว้ภายใน

เป็นการสร้างท่อเข้าไปในท่อผิวเรียบเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่มีการใช้กันมากคือสร้างท่ออะลูมิเนียมเป็นรูปดาวไว้ภายใน โดยมีการสร้างกันตั้งแต่ 5 ถึง 12 แขน ในรูปที่ 3.33 จะเป็นท่อที่มีแกนที่บิดเป็นเกลียวและมีแกนที่เรียบ และท่อที่มีลักษณะของแกนทำเป็นแนวคลื่น ดังรูปที่ 3.34



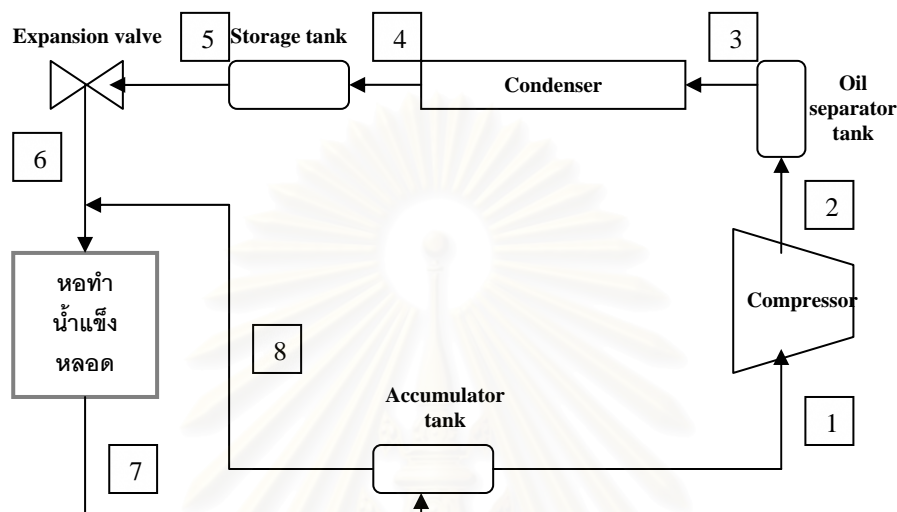
รูปที่ 3.33 ท่อเครื่องทำน้ำเย็นมีอะลูมิเนียมใส่ภายใน (courtesy Wolverine Tubes)



รูปที่ 3.34 ท่อที่มีครีบอะลูมิเนียม (courtesy Hitachi)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.6 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 3.35 วัฏจักรการทำงานของโรงงานน้ำแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการวิจัยที่โรงงานน้ำแข็งสาครทิพย์ ซึ่งสามารถอธิบายวัฏจักรการทำงานของโรงงานได้จากรูปที่ 3.35 ได้ ดังนี้

อุปกรณ์อัดไอ (Compressor) จะทำการอัดไอของแอมโมเนียจากสถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 2 แล้วจากนั้นไอที่อัดแล้วจะไหลผ่านถังแยกน้ำมัน (Oil Separator Tank) แล้วเข้าสู่สถานะที่ 3 ซึ่งเป็นสถานะก่อนเข้าอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เมื่อผ่านอุปกรณ์ควบแน่นแล้วสารทำความเย็นจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลในสถานะที่ 4 แล้วไหลเข้าถังเก็บแอมโมเนียเหลว (Ammonia Liquid Storage Tank) หลังจากนั้นแอมโมเนียเหลวจะไหลออกจากถังเก็บแอมโมเนียเหลว (Ammonia Liquid Storage Tank) เป็นสถานะที่ 5 แล้วไหลเข้าสู่วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) แล้วกลายเป็นสถานะที่ 6 หลังจากนั้นแอมโมเนียที่อยู่ในสถานะผสมกันระหว่างไอและของเหลว (mixture) จะไหลเข้าสู่ชุดคอยล์เย็น (Evaporator) หรือในที่นี้คือ หอทำน้ำแข็งหลอดและออกมาในสถานะที่ 7 เพื่อไหลเข้าสู่ถังแยกไอและของเหลว (Gas – Liquid Storage Tank) เพื่อแยกส่วนที่เป็นไอไปที่อุปกรณ์อัดไอซึ่งเป็นสถานะที่ 1 ส่วนที่เป็นของเหลวในสถานะที่ 8 จะไหลกลับเข้าสู่หอทำน้ำแข็งอีกครั้งหนึ่งรวมกลับของเหลวที่มาจากสถานะที่ 6



## บทที่ 4

### การดำเนินการวิจัยทางภาคสนาม

#### 4.1 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยในการวิจัยนี้ได้มีการตรวจวัดข้อมูลภาคสนามจากโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด ซึ่งได้มีการสร้างเครื่องมือเพื่อทำการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำแข็งหลอด และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับทฤษฎีต่างๆที่ผ่านมา

โดยค่าตัวแปรที่พิจารณาในการวิจัยนี้ในส่วนของ การเก็บข้อมูลภาคสนามแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือตัวแปรกำหนด ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ตัวแปรกำหนด คือตัวแปรที่ต้องกำหนดให้มีค่าคงที่ ในการเก็บข้อมูลนี้สิ่งที่ควบคุมคือ ชนิด ขนาด และความยาวของท่อทำน้ำแข็งหลอด และเวลาต่อรอบการผลิตน้ำแข็งหลอด

ท่อทำน้ำแข็งหลอดทำจากสแตนเลส AISI 302 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 35 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 42 มิลลิเมตร โดยมีความยาวท่อเท่ากับ 3 เมตร

เวลาต่อรอบการผลิตน้ำแข็งหลอดเนื่องจากชุดควบคุมการผลิตน้ำแข็งสามารถที่จะตั้งเวลาเพื่อใช้ในการควบคุมความหนาและความเร็วในการผลิตซึ่งจะแปรเปลี่ยนตามแต่ละฤดูกาล ซึ่งจะมีความต้องการบริโภคน้ำแข็งที่แตกต่างกัน และในที่นี่ในช่วงที่ดำเนินการวิจัยทางโรงงานได้ตั้งค่าเวลาไว้ที่ 28 นาทีต่อรอบการผลิต

2. ตัวแปรอิสระ คือตัวแปรที่ใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการผลิตน้ำแข็ง อันได้แก่เวลา ณ จุดต่างๆที่อยู่ในช่วงเวลารอบการผลิต

3. ตัวแปรตาม คือค่าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อตัวแปรอิสระมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการวิจัยนี้ตัวแปรตามที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์คือ ค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด

## 4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและสร้างขึ้นเองเพื่อใช้ในการวัดค่าความหนาของชั้นน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง

โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังนี้

1. ชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอด จะประกอบด้วยอะลูมิเนียมฉาก จำนวน 2 ชิ้น ประกอบกันเป็นลักษณะรูปตัวที โดยใช้เนื้อขนาด M6 ยาว 15 มิลลิเมตร ในการเชื่อมต่อและเหล็กจับยึดรูปตัวซีเบอร์ 4 จำนวน 3 ตัว ที่มีเจาะรูเพื่อลดน้ำหนักโดยรวมของชุดเครื่องมือ ประกอบเข้าที่ปลายทั้ง 3 ด้านของเหล็กอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 4.3 เหล็กจับยึดรูปตัวซีเบอร์ 4

โดยรายละเอียดการออกแบบอะลูมิเนียมทั้งสองชิ้นจะมีรายละเอียดการออกแบบในภาคผนวก ข

2. ชุดหัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด จะประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้น คือ หัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด, เหล็กยึดหัววัดกับโครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งและเวอร์เนียร์ สำหรับใช้วัดค่าความหนาของน้ำแข็ง ซึ่งหัววัดความหนาจะใช้หลักการของสามเหลี่ยมคล้ายเพื่อทำการหาค่าความหนาของน้ำแข็งในหลอด โดยที่หัววัดจะมีลักษณะเป็นก้านเหล็ก 2 อันไขว้กัน



คล้ายกรรไกร ดังรูปที่ 4.4 เพื่อสอดเข้าไปในหลอดท่อทำน้ำแข็งเพื่อวัดความกว้างของท่อน้ำแข็ง ที่ลดลง ณ เวลาต่างๆโดยใช้เวอร์เนียทำการวัดค่าที่ปลายด้านบนท่อน้ำแข็ง ซึ่งค่าที่ได้นั้นต้องนำมาคูณกับค่าปรับแก้ที่ได้จากทฤษฎีสัมเหลี่ยมคล้าย โดยที่หัววัดนี้มีค่าปรับแก้ที่ 3.53846 และนำมาลบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อคือ 35 มิลลิเมตร แล้วหารค่าที่ได้ด้วยสอง เพื่อจะได้ค่าความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลา นั้นๆทั้งนี้หัววัดจะเชื่อมต่อกับโครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งโดยที่มีฟ่อนอะลูมิเนียมทำการเชื่อมโดยที่หัววัดสามารถเคลื่อนตำแหน่งไปในทิศต่างๆได้ด้วย



รูปที่ 4.4 หัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 4.5 เหล็กยึดหัววัดกับโครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็ง



รูปที่ 4.6 เวอร์เนียสำหรับใช้วัดค่าความหนาของน้ำแข็ง

โดยสามารถศึกษารายละเอียดการออกแบบ ชุดหัววัดค่าความหนาของน้ำแข็ง และเหล็กยึดหัววัดกับโครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งได้ในภาคผนวก ข

3. อุปกรณ์สำหรับกั้นน้ำ เพื่อใช้ในการกั้นน้ำที่จะไหลกลับเข้าไปในท่อทำน้ำแข็งในขณะที่ทำการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง ซึ่งระดับน้ำที่ท่วมหลอดท่อทำน้ำแข็งอยู่นั้นจะมีระดับความสูงประมาณ 10 ถึง 12 เซนติเมตร ดังนั้นการกั้นน้ำจึงต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถกั้นน้ำได้ในระดับที่สูงกว่านั้น ซึ่งท่อที่นำมากั้นจะประกอบด้วยท่อพีวีซีจำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ท่อตรงยาว 9 เซนติเมตร และท่อที่มีลักษณะเป็นขนาด  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว ที่มีการเจาะรูในที่ปลายท่อเพื่อลดขนาดให้สามารถสอดเข้าไปในท่อทำน้ำแข็งได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์สำหรับกั้นน้ำ

4. นาฬิกาจับเวลา เพื่อจับเวลาการผลิตน้ำแข็ง ณ เวลา ต่างๆ ที่ทำการเก็บข้อมูล

### 4.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

1. ทำการติดตั้งชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอดเข้ากับเครื่องทำน้ำแข็ง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การติดตั้งชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็ง

2. ทำการประกอบชุดหัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด โดยใช้ชนิด M6 เป็นตัวยึดและเป็นจุดหมุนไปพร้อมกัน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การประกอบชุดหัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด

3. ทำการประกอบชุดหัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดเข้ากับชุดจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การประกอบชุดทดลอง

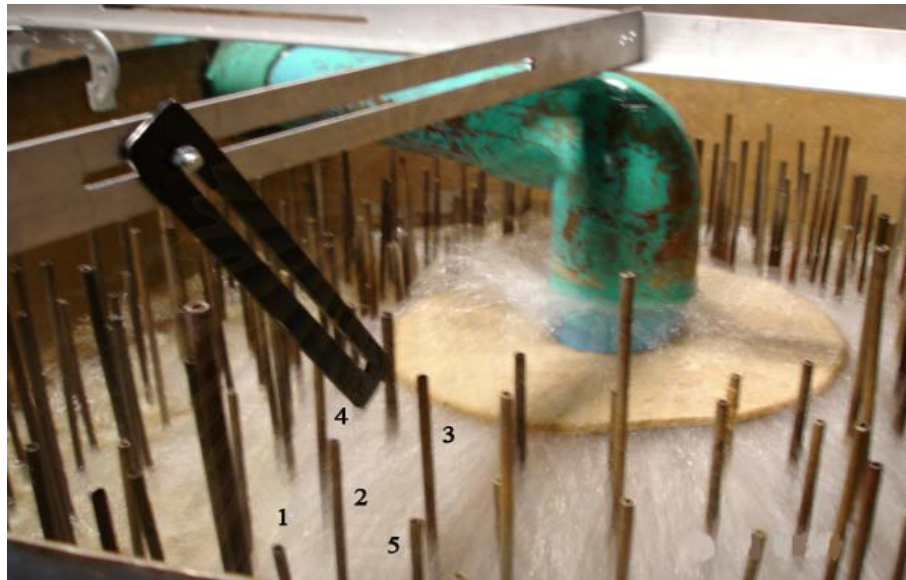
4. นำอุปกรณ์สำหรับกั้นน้ำติดตั้งเข้ากับหลอดทดลองที่ต้องการวัดค่า ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกั้นน้ำ

#### 4.4 ขั้นตอนการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เลือกหลอดทำน้ำแข็งที่จะทำการวัดจำนวน 5 หลอด โดยที่แต่ละหลอดจะตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ตัวอย่างดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเลือกหลอดทำน้ำแข็ง

2. เริ่มทำการวัดเมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งเป็นค่าแรก และอ่านค่าความดันขาเข้าและออกที่เครื่องอัดไอเพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนียในการผลิตนั้นๆ

3. จากนั้นเริ่มทำการเก็บค่าทุกๆ 5 นาที โดยเริ่มจาก หลอดที่ 1 ในนาทีที่ 5 หลอดที่ 2 ในนาทีที่ 10 หลอดที่ 3 ในนาทีที่ 15 ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบ ทั้ง 5 หลอดในนาทีที่ 25 โดยค่าสุดท้ายในนาทีที่ 28 จะเป็นการวัดค่าของน้ำแข็งที่ออกจากเครื่องมาแล้ว ถือเป็นข้อมูล 1 ชุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.13 การวัดค่า

4. ในรอบการผลิตถัดๆ ไปจะเริ่มจากหลอดที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ สลับหมุนเวียนกันไปเรื่อยๆ ซึ่งจะได้ข้อมูลมาทั้งสิ้นจำนวน 5 ชุด
5. จากนั้น นำค่าที่ได้นั้นมาคูณกับค่าปรับแก้ที่ได้จากทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้าย โดยที่หัววัดนี้มีค่าปรับแก้ที่ 3.538 และนำมาลบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อคือ 35 มิลลิเมตร แล้วหารค่าที่ได้ด้วย 2 เพื่อจะได้ค่าความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลา นั้นๆ ของแต่ละชุดข้อมูล
6. นำค่าความหนาที่ได้มาทั้งหมดหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีต่อไป

## บทที่ 5

### การดำเนินการวิจัยทางภาคทฤษฎี

5.1 การหาค่าอัตราความร้อนที่ผ่านท่อน้ำแข็งและอุณหภูมิที่ผิวนอกของท่อน้ำแข็ง ณ ระดับความหนาของชั้นน้ำแข็งและเวลาต่างๆ กัน

5.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวเรียบ

โดยในที่นี้ได้เลือกใช้สูตรทำความเย็นคือ แอมโมเนีย เราจะได้คุณสมบัติของแอมโมเนียที่ทำต่อไปนี้

จากสมการที่ (3.8)

$$\frac{\alpha_{nb}d}{k_L} = 0.0546 \left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \left( \frac{qd}{k_L T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \left( \frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{0.248} \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33} \quad (5.1)$$

และจากสมการที่ (3.9)

$$d = 0.0146 \beta \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

โดยที่ค่า

$$q = \alpha_{nb} \Delta T \quad (5.3)$$

โดย

$$\Delta T = T_{w,o} - T_{sat} \quad (5.4)$$

เราจะสามารถจัดรูปของสมการที่ (5.1) ให้อยู่ในรูป



$$\alpha_{nb} = C \cdot \left( \frac{\Delta T}{T_{sat}} \right)^{2.0303} \quad (5.5)$$

โดยค่าของ C เราจะสามารถหาได้จาก ภาคผนวก ง

### 5.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นขรุขระ

จากสมการที่ (3.32) ถึง (3.36)

$$Ja = 0.137 [Re]^{0.292} [\lambda]^{-0.190} [N_{cf}]^{0.065} \quad (3.32)$$

โดย

$$Re = \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \quad (3.33)$$

$$Ja = \frac{C_{pL} \Delta T}{\Delta h_v} \quad (3.34)$$

$$N_{cf} = \frac{\mu_{Lc}^2}{\eta \rho_L \sigma} \quad (3.35)$$

$$\lambda = \frac{\eta}{\delta} \quad (3.36)$$

ซึ่งเมื่อแทนสมการที่ (3.33) ถึง (3.36) ลงในสมการที่ (3.32) เราจะได้ว่า

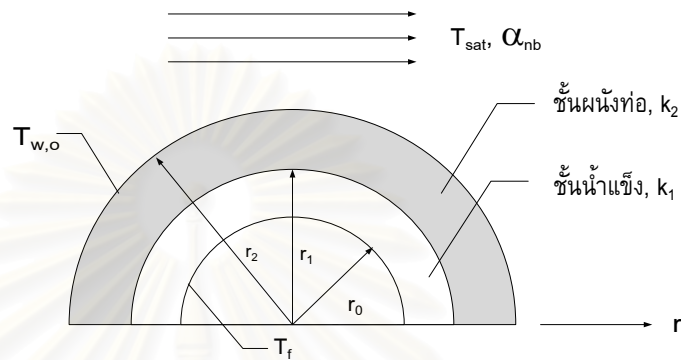
$$\frac{C_{pL} \Delta T}{\Delta h_v} = 0.137 \left[ \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \right]^{0.292} \left[ \frac{\eta}{\delta} \right]^{-0.190} \left[ \frac{\mu_{Lc}^2}{\eta \rho_L \sigma} \right]^{0.065} \quad (5.6)$$

ซึ่งเมื่อเราทำการแทนค่าคุณสมบัติต่างๆของสารทำความเย็นลงไปแล้ว และทำการแทนค่าสมการที่ (5.3) และ (5.4) จะได้อยู่ในรูปของ

$$\alpha_{nb} = C_r \cdot T_{sat}^{2.42457} \quad (5.7)$$

โดยค่าของ  $C_f$  เราจะสามารถหาได้จาก ภาคผนวก จ

### 5.1.3 การหาค่าอัตราความร้อนที่ไหลเกิดน้ำแข็งผ่านผนังท่อสแตนเลสสู่สารทำความเย็นที่ระดับความหนาของน้ำแข็งต่างๆ



รูปที่ 5.1 แสดงการจำลองรูปแบบการถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้น

จากรูปกำหนดให้

$k_1$  และ  $k_2$  คือ ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งและท่อตามลำดับ

$r_0$ ,  $r_1$  และ  $r_2$  คือ รัศมีของรูกลวงของน้ำแข็ง, รัศมีภายในและนอกของท่อตามลำดับ

$T_f$  คือ อุณหภูมิบนผิวของน้ำแข็งซึ่งเท่ากับ  $0^\circ\text{C}$

$T_{w,i}$  คือ อุณหภูมิบนผิวของท่อด้านใน

$T_{w,o}$  คือ อุณหภูมิบนผิวของท่อด้านนอก

$T_{sat}$  คือ จุดเดือดของสารทำความเย็น

$\alpha_{nb}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น

ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการคำนวณโดยวิธี Quasi-steady method โดยเรากำหนดสมมติฐานเพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณดังนี้

1. กระบวนการนี้อยู่ในสถานะ Quasi-steady state
2. เป็นการนำความร้อนใน 1 มิติ
3. คุณสมบัติของสารทำความเย็นและท่อมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าอัตราถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วและยังเป็นวิธีที่ง่าย เนื่องจากผลของข้อมูลที่เทียบกับเวลาหายไปเนื่องจากสภาวะตั้งเป็นสภาวะคงที่ (Steady-state) ซึ่งสามารถค่าความต้านทานความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆหาได้ดังนี้

- ที่ชั้นของน้ำแข็ง ( $R_1$ ) :

$$R_1 = \frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (5.8)$$

- ที่ชั้นของผนังท่อ ( $R_2$ ) :

$$R_2 = \frac{1}{2\pi k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5.9)$$

- ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ ( $R_3$ ) :

$$R_3 = \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_{nb}} \quad (5.10)$$

ดังนั้นค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระบวนการนี้คือ

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{k_1} \ln \left( \frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right] + \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} \right\} \quad (5.11)$$

ซึ่งค่าการระความร้อนต่อหน่วยความยาว (W/m) คือ

$$Q = \frac{T_f - T_{sat}}{R} \quad (5.12)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (5.11) เราจะได้

$$Q = \frac{2\pi(T_f - T_{sat})}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left( \frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} \right\}} \quad (5.13)$$

โดยเราจะแบ่งเป็นส่วนกรณีท่อผิวเรียบและท่อผิวขรุขระ ดังนี้

- ท่อผิวเรียบ

จากสมการที่ (5.5) กำหนดให้

$$C_s = \frac{C}{T_{\text{sat}}^{2.0303}} \quad (5.14)$$

เราจะได้

$$\alpha_{\text{nb}} = C_s \cdot \Delta T^{2.0303} \quad (5.15)$$

เมื่อคิดสมดุลทางความร้อนที่ผนังท่อภายนอกเพื่อทำการหาค่าของ  $T_{\text{w,o}}$  จะได้ดังนี้

$$\frac{T_{\text{w,o}} - T_{\text{sat}}}{R_3} = \frac{T_f - T_{\text{w,o}}}{R_1 + R_2} \quad (5.16)$$

แทนค่าความต้านทานความร้อนจากสมการที่ (5.8)-(5.10) แล้วทำการจัดรูปสมการจะได้

$$\left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) (T_{\text{w,o}} - T_{\text{sat}}) = \frac{1}{r_2 \alpha_{\text{nb}}} (T_f - T_{\text{w,o}}) \quad (5.17)$$

แทนสมการที่ (5.5) ลงในสมการที่ (5.17) จะได้

$$\left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) (T_{\text{w,o}} - T_{\text{sat}}) = \frac{1}{r_2 C_s (T_{\text{w,o}} - T_{\text{sat}})^{2.0303}} (T_f - T_{\text{w,o}}) \quad (5.18)$$

กำหนดให้

$$C_1 = \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (5.19)$$

เราจะได้ว่า

$$C_1(T_{w,o} - T_{sat}) = \frac{1}{r_2 C_s (T_{w,o} - T_{sat})^{2.0303}} (T_f - T_{w,o}) \quad (5.20)$$

$$(T_{w,o} - T_{sat})^{3.0303} = \frac{1}{r_2 C_s C_1} [(T_f - T_{sat}) - (T_{w,o} - T_{sat})] \quad (5.21)$$

จากสมการที่ (5.4) เมื่อทำการจัดรูปของสมการจะได้ว่า

$$\Delta T^{3.0303} + \frac{1}{r_2 C_s C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_s C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (5.22)$$

- ท่อผิวขรุขระ

จากสมการ (5.7)

$$\alpha_{nb} = C_r \cdot \Delta T^{2.42457} \quad (5.7)$$

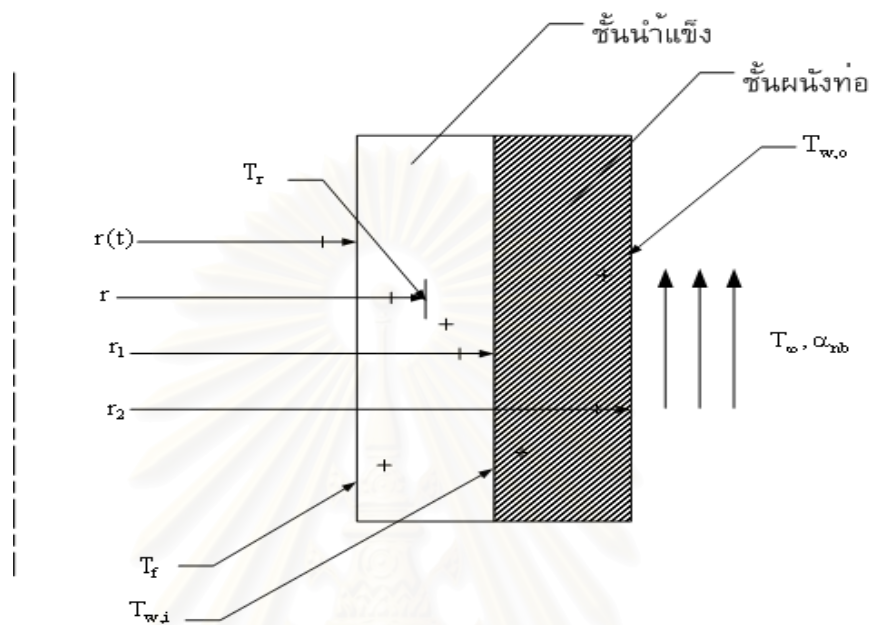
ในการทำงานเดียวกันกับส่วนของท่อผิวเรียบจากสมการที่ (5.22) เราจะได้เป็นสมการดังนี้

$$\Delta T^{3.42457} + \frac{1}{r_2 C_r C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_r C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (5.23)$$

เนื่องจากสมการที่ (5.22) และสมการ (5.23) เป็นสมการโพลิโนเมียลซึ่งต้องทำการสร้างโปรแกรมขึ้นมาเพื่อช่วยให้การหาค่าของสมการซึ่งก็คือค่าของ  $\Delta T$  ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณหาค่า อัตราความร้อนและค่าอุณหภูมิที่ผิวนอกของท่อต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของน้ำแข็งกับเวลาสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 5.2 ปัญหาของการแข็งตัวภายในหลอดทำน้ำแข็งหลอด

ทำสมดุลทางความร้อนที่ตำแหน่ง  $r$  ใดๆในชั้นของน้ำแข็ง จะได้ว่า

$$\frac{T_f - T_r}{R_r} = \frac{T_f - T_\infty}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.24)$$

โดย

- ที่ตำแหน่ง  $r$  ใดๆ ( $R_r$ ) :

$$R_r = \frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{r}{r(t)} \quad (5.25)$$

- ที่ชั้นของน้ำแข็ง ( $R_1$ ) :

$$R_1 = \frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{r_1}{r(t)} \quad (5.26)$$

- ที่ชั้นของผนังท่อ ( $R_2$ ) :

$$R_2 = \frac{1}{2\pi k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5.27)$$

- ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ ( $R_3$ ) :

$$R_3 = \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_{nb}} \quad (5.28)$$

จากสมการ (5.24) จะได้

$$\frac{T_f - T_r}{\frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r}{r(t)} \right]} = \frac{T_f - T_\infty}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \quad (5.29)$$

จากสมการที่ (3.40) จะละทิ้งการนำความร้อนของน้ำไป จะได้

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \rho L \frac{dr(t)}{dt}$$

และ (5.29) จะได้ว่า

$$T_1 = T_r = T_f - \frac{(T_f - T_\infty) \times \frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r}{r(t)} \right]}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \quad (5.30)$$

แทนค่า (5.30) ลงใน (3.40)

$$\rho L \frac{dr(t)}{dt} = k_1 \frac{\partial}{\partial r} \left\langle T_f - \frac{(T_f - T_\infty) \times \frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r}{r(t)} \right]}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \right\rangle \quad (5.31)$$

จาก (5.31) ทำการจัดรูป และให้  $r = r(t)$  จะได้



$$\frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} dt = \left\langle r(t) \left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\} \right\rangle dr(t) \quad (5.32)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (5.32) จะได้

$$\frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} t \Big|_0^t = \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_1} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \quad (5.33)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (5.33) แล้วจะพบว่าสามารถอินทิเกรตออกได้ด้วยวิธีธรรมดาได้เพียงสองพจน์แรกเท่านั้น ซึ่งพจน์ที่สามนั้นจะทำการหาค่าด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป จากสมการที่ (5.33) เราจะได้

$$\begin{aligned} \frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} t = & \frac{1}{k_1} \left\{ \frac{[r(t)]^2}{2} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{[r(t)]^2}{4} - \frac{r_1^2}{4} \right\} + \frac{1}{2k_2} \{ [r(t)]^2 - r_1^2 \} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \\ & + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \end{aligned} \quad (5.34)$$

จากสมการที่ (5.34) จะเห็นว่าพจน์ทางขวามือพจน์ที่สามนั้นไม่สามารถหาค่าของอินทิกรัลได้โดยตรง เนื่องจากว่าค่าของ  $\alpha_{nb}$  เป็นฟังก์ชันของค่า  $\Delta T$  หรือ  $(T_{w,o} - T_f)$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ  $r(t)$  ดังนั้นจะสามารถหาค่าของพจน์ดังกล่าวได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาค่าของอินทิกรัลโดยวิธีของซิมป์สัน และค่า  $r(t)$  ที่ได้ในแต่ละเวลานั้นจะแสดงถึงรัศมีของท่อทำน้ำแข็ง ณ เวลานั้นๆ ที่ได้เปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อนำไปลบออกจากค่ารัศมีท่อเดิมจะสามารถหาค่าความหนาของน้ำแข็งออกมา

โดยการคำนวณทั้งหมดตั้งแต่ในหัวข้อ 5.1 ถึง 5.2 นี้ได้มีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กเพื่อที่จะช่วยในการคำนวณทางวิธีเชิงเลขต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น วิธีแก้สมการโพลีโนเมียลของนิเวศ-ราฟสัน, วิธีการหาค่าของอินทิกรัลโดยวิธีของซิมป์สัน และวิธีการทำซ้ำอื่นๆ โดยมีการกำหนดค่าเบื้องต้นดังต่อไปนี้

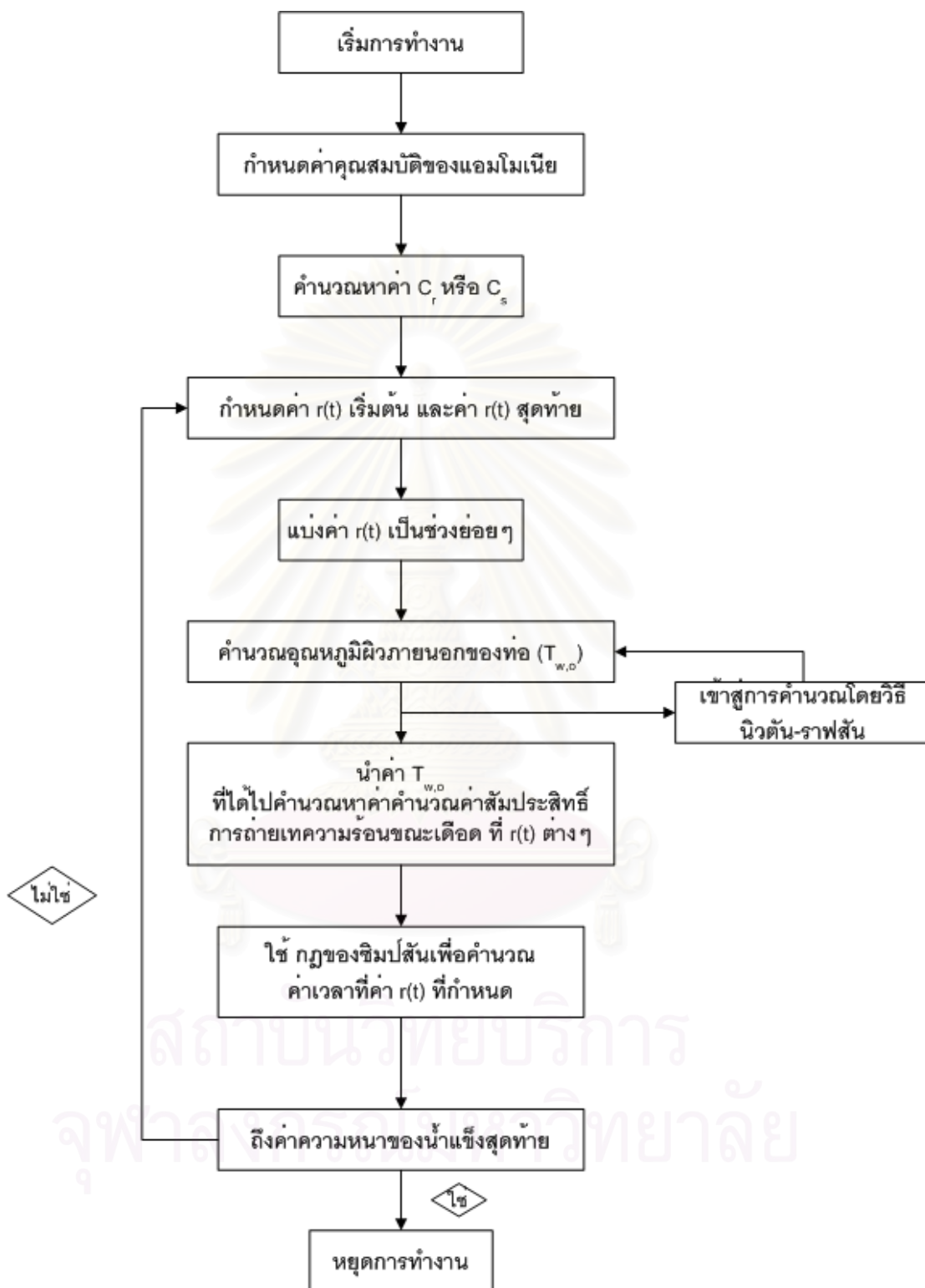
- เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ เท่ากับ 35 มิลลิเมตร
- เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ เท่ากับ 41 มิลลิเมตร
- ความหนาของน้ำแข็งมากที่สุดที่ 11.06 มิลลิเมตร

- ค่าความหนาแน่นของน้ำแข็ง เท่ากับ  $910 \text{ kg/m}^3$
- ค่าสภาพนำความร้อนของท่อ เท่ากับ  $15.09 \text{ W/m.K}$
- ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็ง เท่ากับ  $2.22 \text{ W/m.K}$
- อุณหภูมิของผิวท่อภายใน เท่ากับ  $273.15 \text{ K}$
- อุณหภูมิอิมิตัวของแอมโมเนีย เท่ากับ  $265.6 \text{ K}$
- คาบเวลาในการทำน้ำแข็ง เท่ากับ 28 นาที

ซึ่งกระบวนการคำนวณทั้งหมดจะแสดงไว้ในแผนผังการทำงานในรูปที่ 5.3 ดังนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ผังงานแบบง่าย (Simple flow chart)

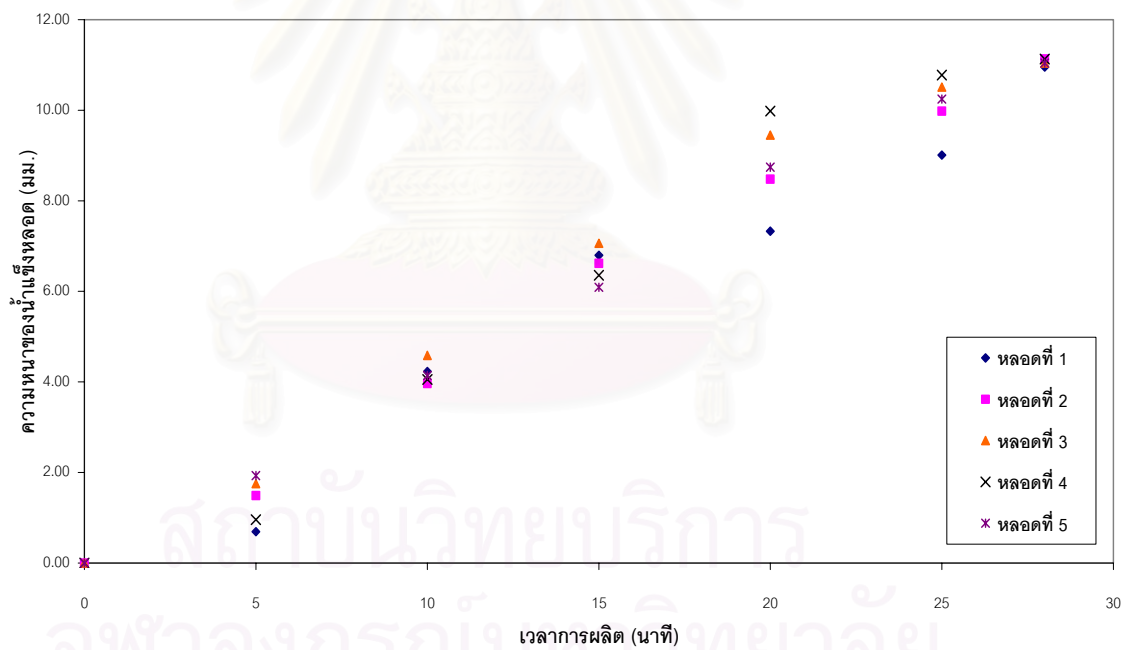
## บทที่ 6

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 6.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ

##### 6.1.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆในภาคสนาม

จากข้อมูลเก็บจากภาคสนามซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จะเป็นการแสดงค่าความหนาของน้ำแข็งซึ่งแปลงจากค่าจากค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำแข็งที่วัดได้จากภาคสนาม



รูปที่ 6.1 ความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิต

จากรูปที่ 6.1 นั้นจะเห็นว่าค่าความหนาของน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมี ความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆของการผลิต ซึ่งทั้งนี้เป็น เพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง ตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการนำความร้อนที่ ต่ำซึ่งเท่ากับว่าเป็นตัวต้านทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียซึ่ง

เป็นสารทำความเย็นซึ่งอยู่ภายนอกของท่อ ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งมีความหนาขึ้นเรื่อยๆก็จะยิ่งถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น ซึ่งอัตราการความร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลให้ในช่วงท้ายๆรอบการผลิตน้ำแข็งจะโตช้าลงนั่นเอง ซึ่งก็หมายถึงภาวะของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน

### 6.1.2 การหาความหนาของน้ำแข็งเมื่อเวลาต่างๆจากการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับท่อผิวเรียบ

ในการวิเคราะห์ในส่วนนี้นั้นจะใช้ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเดือดบนพื้นผิวเรียบของ Stephan และ Abdelsalam (1980) ดังสมการที่ (3.8) และ (3.9)

$$\frac{\alpha_{nb}d}{k_L} = 0.0546 \left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \left( \frac{qd}{k_L T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \left( \frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{0.248} \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33} \quad (3.8)$$

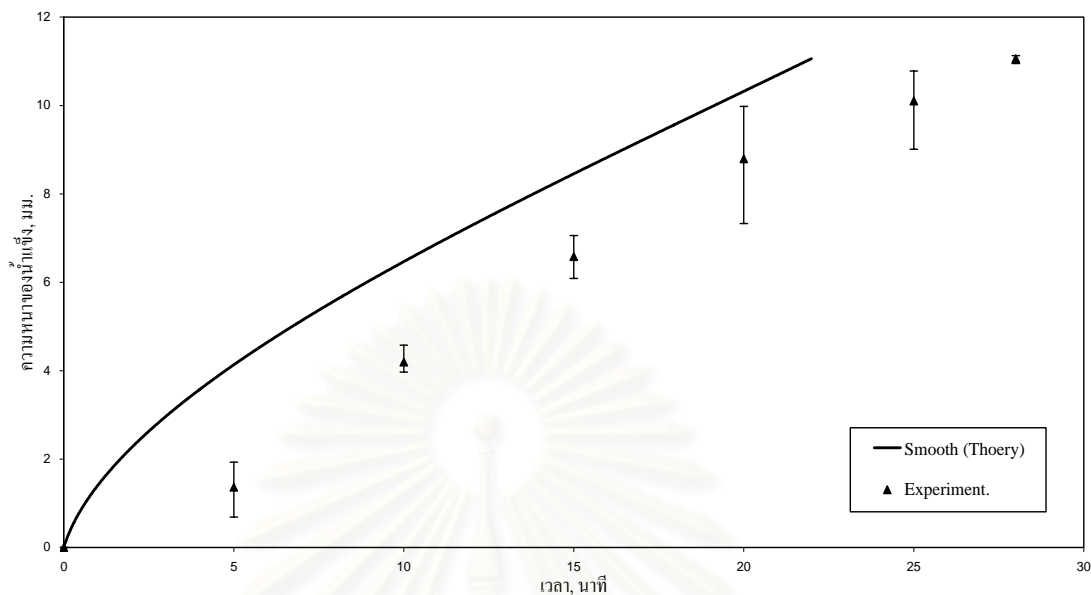
และ

$$d = 0.0146\beta \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำแข็งกับเวลา ในสมการที่ (5.34)

$$\frac{(T_\infty - T_f)t}{\rho L} = \frac{1}{k_1} \left\{ \frac{[r(t)]^2}{2} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{[r(t)]^2}{4} - \frac{r_1^2}{4} \right\} + \frac{1}{2k_2} \{ [r(t)]^2 - r_1^2 \} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \quad (5.34)$$

ซึ่งในคำนวณส่วนนี้จะใช้ค่าคุณสมบัติของแอมโมเนียที่อุณหภูมิอิ่มตัวที่  $-7.55 \text{ }^\circ\text{C}$  หรือ  $265.6 \text{ K}$  ร่วมกับสมมติฐานของกระบวนการนี้เป็นแบบ Quasi-Steady State ซึ่งจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณและข้อมูลภาคสนาม

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะมีความสอดคล้องกันกับข้อมูลของภาคสนามในเชิงคุณภาพ ซึ่งค่าที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าทางทฤษฎีและค่าที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์, 30 เปอร์เซ็นต์ และ 17 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงแรก ช่วงกลางกระบวนการผลิต และในช่วงเวลาที่ 20 นาทีในช่วงท้ายของการผลิต ตามลำดับ ส่วนค่าที่ได้แตกต่างกันนั้นเนื่องจากการตั้งอยู่บนสมมติฐานของ Quasi-Steady State นั้นเอง และการกำหนดค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอมโมเนียและท่อให้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับกับอุณหภูมิที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการทำงานจริงของระบบในการทำน้ำแข็งนั้นระบบจะไม่ได้คงที่เช่นเดียวกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น อีกทั้งการใช้ค่าความดันในฝั่งดูดเข้าเครื่องอัดไอในการประมาณค่าคุณสมบัติของแอมโมเนียในถังทำน้ำแข็ง ซึ่งเมื่อพิจารณาในช่วงเริ่มของการผลิตนั้นค่าเริ่มต้นต่างๆของน้ำไม่ได้เป็นไปดังค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้ในทางทฤษฎี ทำให้มีความผิดพลาดสูงในช่วงแรกของการผลิต แต่เนื่องจากผลที่ได้ยังมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจะสามารถนำผลที่ได้จากทางทฤษฎีไปจำลองข้อมูลจากทางภาคสนามในการเปรียบเทียบกับผลจากทางทฤษฎีในกรณีของท่อที่มีการแตงผิวให้ขรุขระได้ด้วย โดยในรูปที่ 5.4 ค่าของความหนาของน้ำแข็งจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและช้าลงเรื่อยๆ ในช่วงท้ายของรอบการผลิต ทั้งนี้เป็นเหตุผลเช่นเดียวกับในหัวข้อ 6.1.1



### 6.1.3 การหาความหนาของน้ำแข็งเมื่อเวลาต่างๆจากการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับท่อ น้ำแข็งที่มีผิวภายนอกขรุขระ

ในการวิเคราะห์ในส่วนนี้นั้นจะใช้ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการ  
เดือดบนพื้นผิวขรุขระของความสัมพันธ์จากการทดลองของ Rudemiller และ Lindsay (1990)  
ดังสมการที่ (3.32) ถึง (3.36) เพื่อหาค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้แก่

$$Ja = 0.137[Re]^{0.292} [\lambda]^{-0.190} [N_{cf}]^{0.065} \quad (3.32)$$

โดย

$$Re = \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \quad (3.33)$$

$$Ja = \frac{C_{pL} \Delta T}{\Delta h_v} \quad (3.34)$$

$$N_{cf} = \frac{\mu_{L:}^2}{\eta \rho_L \sigma} \quad (3.35)$$

$$\lambda = \frac{\eta}{\delta} \quad (3.36)$$

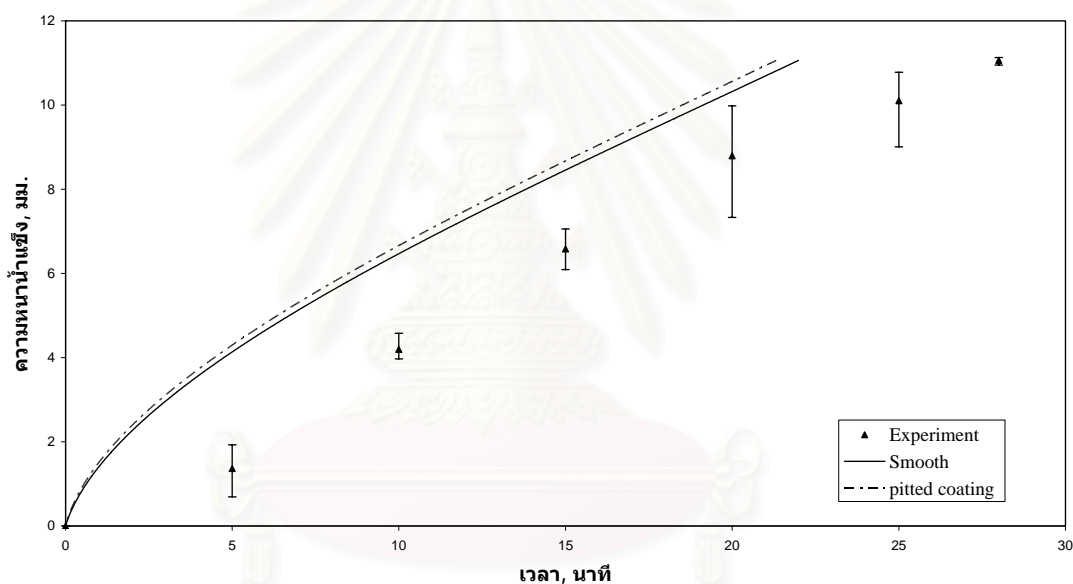
และสมการที่ (5.6)

$$\frac{C_{pL} \Delta T}{\Delta h_v} = 0.137 \left[ \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \right]^{0.292} \left[ \frac{\eta}{\delta} \right]^{-0.190} \left[ \frac{\mu_{L:}^2}{\eta \rho_L \sigma} \right]^{0.065} \quad (5.6)$$

โดยเลือกใช้ค่า Porosity ( $\varepsilon$ ) = 0.5, Average pore diameter ( $\eta$ ) = 10  $\mu\text{m}$  และ  
Porous layer thickness ( $\delta$ ) = 100  $\mu\text{m}$  และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำแข็งกับ  
เวลา ในสมการที่ (5.34)

$$\frac{(T_\infty - T_f)_t}{\rho L} = \frac{1}{k_1} \left\{ \frac{[r(t)]^2}{2} \ln \left[ \frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{[r(t)]^2}{4} - \frac{r_1^2}{4} \right\} + \frac{1}{2k_2} \{ [r(t)]^2 - r_1^2 \} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \quad (5.34)$$

ซึ่งในคำนวณในส่วนนี้จะใช้ค่าคุณสมบัติของแอมโมเนียที่อุณหภูมิอิ่มตัวที่  $-7.55 \text{ }^\circ\text{C}$  หรือ  $265.6 \text{ K}$  ร่วมกับการให้สมมติฐานของกระบวนการนี้เป็นแบบ Quasi-Steady State ซึ่งจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบความหนาแน่นของน้ำแข็งจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณและข้อมูลภาคสนาม

จากรูปที่ 6.3 จะเห็นว่าผลที่ได้จากท่อที่มีผิวขรุขระนั้นมีความสอดคล้องกับผลของข้อมูลภาคสนามในเชิงคุณภาพ และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1.1 โดยการทำงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า Porosity ( $\epsilon$ ) = 0.5, Average pore diameter ( $\eta$ ) =  $10 \text{ }\mu\text{m}$  และ Porous layer thickness ( $\delta$ ) =  $100 \text{ }\mu\text{m}$  เป็นชุดข้อมูลเปรียบเทียบเนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมา ชุดค่าเหล่านี้ได้เป็นที่นิยมใช้และได้ให้ผลการคำนวณและการทดลองออกมาในแนวโน้มที่ดีและเป็นไปได้ โดยจากรูปจะเห็นว่าที่ขนาดของรัศมีท่อหรือที่ระดับความหนาเดียวกันท่อที่มีผิว

ขรุขระจะให้เวลาในการผลิตเร็วกว่าท่อผิวเรียบประมาณ 40.2 วินาที หรือประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ดีขึ้นกว่าท่อผิวเรียบนั่นเอง

## 6.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิที่ผิวภายนอกของท่อน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆจากการคำนวณทางทฤษฎี

### - ท่อผิวเรียบ

จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะสามารถหาค่าอุณหภูมิผิวภายนอกของท่อน้ำแข็งได้จากสมการที่ (5.22) ดังนี้

$$\Delta T^{3.0303} + \frac{1}{r_2 C_s C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_s C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (5.22)$$

### - ท่อผิวขรุขระ

จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะสามารถหาค่าอุณหภูมิผิวภายนอกของท่อน้ำแข็งได้จากสมการที่ (5.23) ดังนี้

$$\Delta T^{3.42457} + \frac{1}{r_2 C_r C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_r C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (5.23)$$

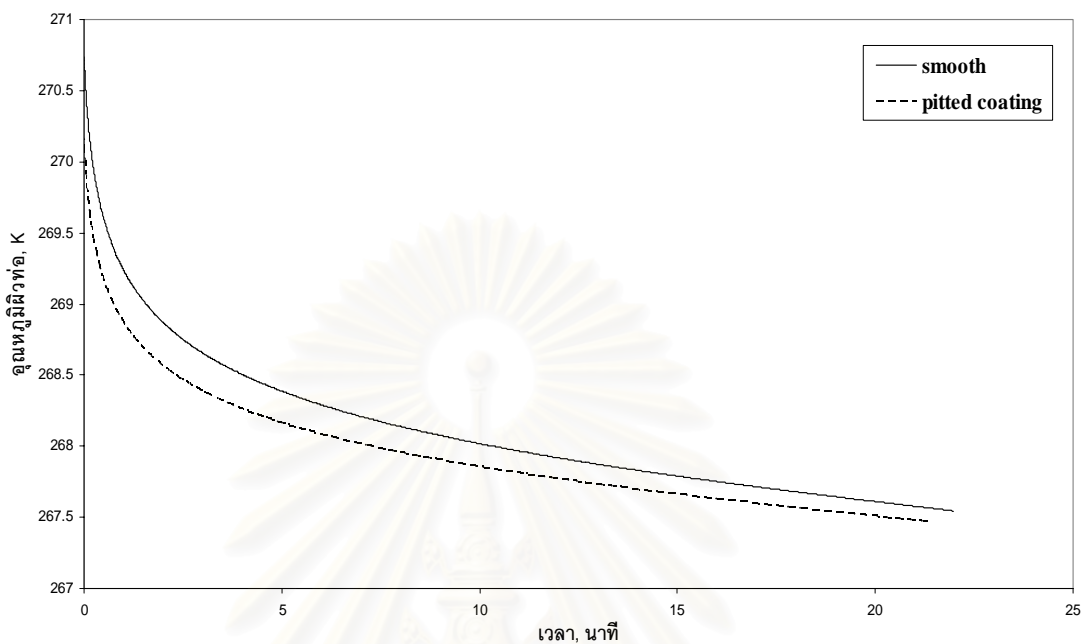
ซึ่งทั้งสองกรณีมีการใช้สมการที่ (5.4) ร่วมด้วยในการแก้ปัญหา ดังนี้

$$\Delta T = T_{w,o} - T_{sat} \quad (5.4)$$

จากสมการที่ (5.4) จะหาค่าอุณหภูมิที่ผิวภายนอกท่อน้ำแข็งดังนี้

$$T_{w,o} = T_{sat} + \Delta T \quad (6.1)$$

จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าค่าของอุณหภูมิที่ผิวภายนอกของท่อจะค่อยๆ ลดต่ำลงจากค่าอุณหภูมิที่เท่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ 273.15 K จนกระทั่งมาใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิอิมิตัวของแอมโมเนียที่อยู่ภายนอกผิวท่อ ทั้งนี้เนื่องจากการส่งผ่านความร้อนจากน้ำอุณหภูมิ 273.15 K ทำได้ยากขึ้นเนื่องจากชั้นความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งประพัตตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากมีค่าสภาพการนำความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อยิ่งหนาขึ้นการถ่ายเทความร้อนก็ทำได้ยากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ผิวภายนอกของท่อมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอิมิตัวของแอมโมเนียที่ 265.6 K

เส้นกราฟของท่อผิวขรุขระมีแนวโน้มเดียวกันกับท่อผิวเรียบ ซึ่งที่เวลาเดียวกันจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อผิวขรุขระนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อผิวเรียบอยู่เล็กน้อยตลอดช่วงเวลาการผลิต ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่น้ำแข็งได้ก่อตัวขึ้นได้เร็วกว่า ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่อุณหภูมิ 273.15 K มาสู่ผิวท่อด้านนอกจะทำได้ยากกว่าในกรณีของท่อผิวเรียบ ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งด้วยเหตุผลนี้อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของท่อขรุขระจึงมีค่าที่ต่ำกว่าและมีค่าใกล้เคียง

อุณหภูมิเริ่มต้นของแอมโมเนีย โดยที่ในช่วงแรกจะมีค่าต่ำกว่าประมาณ 0.08 เฟอร์เซนต์หรือค่า  $\Delta T$  ต่างกันประมาณ 0.215 K และมีค่าต่ำกว่าประมาณ 0.04 เฟอร์เซนต์หรือค่า  $\Delta T$  ต่างกันประมาณ 0.107 K ในช่วงท้ายของการผลิต

### 6.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะสารทำความเย็นมีการเดือดจากการคำนวณทางทฤษฎี

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.15) และ (5.7) ดังนี้

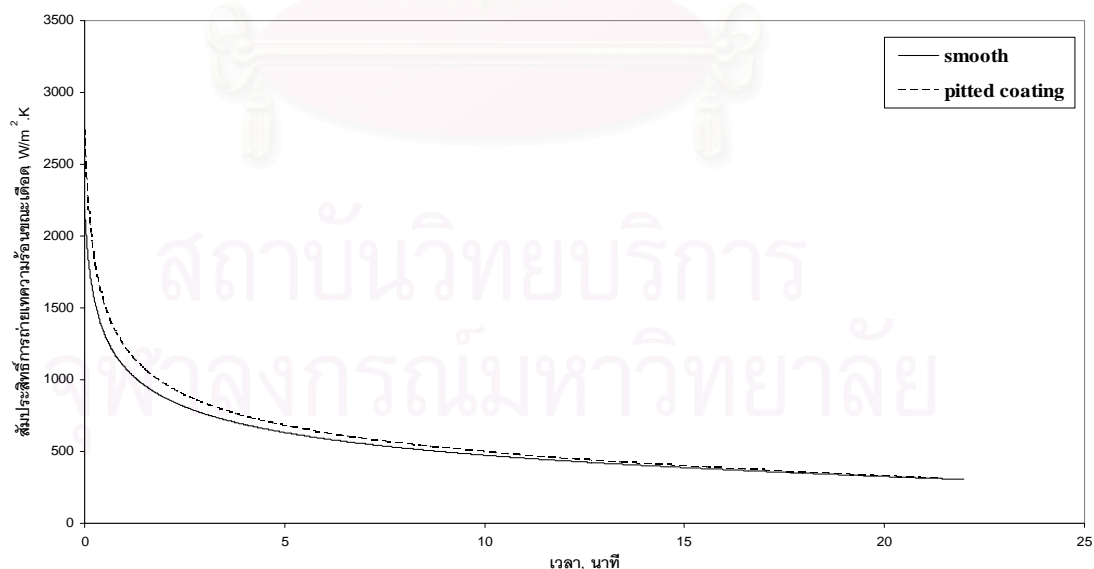
- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดสำหรับท่อผิวเรียบ

$$\alpha_{nb} = C_s \cdot \Delta T^{2.0303} \quad (5.15)$$

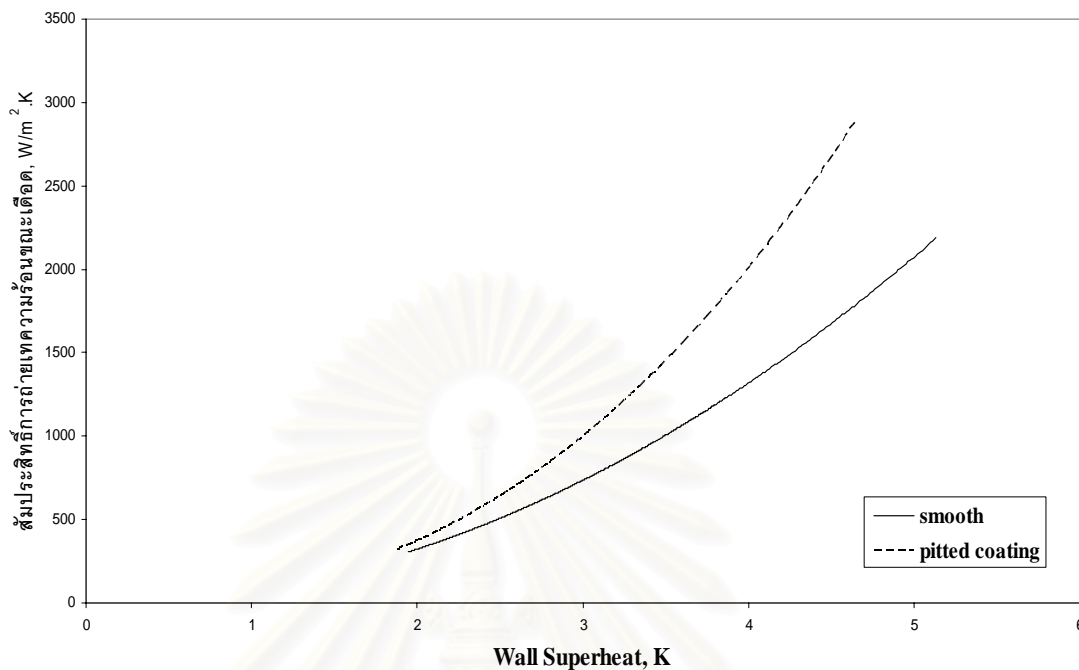
- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดสำหรับท่อผิวขรุขระ

$$\alpha_{nb} = C_r \cdot T_{sat}^{2.42457} \quad (5.7)$$

ซึ่งจากการคำนวณจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระ เทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณ



รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับ Wall Superheat จากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดจากท่อผิวขรุขระมีค่าที่สูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดจากท่อผิวเรียบ ซึ่งในช่วงแรกๆ จะมีค่าแตกต่างกันมากประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเวลาผ่านไปค่าความแตกต่างนี้จะมีน้อยลงจนมีค่าแตกต่างกันประมาณ 2.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งนี้ เป็นผลมาจากลักษณะผิวของท่อขรุขระที่มีส่วนช่วยในการเร่งให้เกิดการเดือดได้เร็วขึ้น โดยที่ทั้งการเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนและกลไกในการช่วยดักจับไอของแอมโมเนียเพื่อให้เกิดฟองไอน์ได้ดีขึ้นกว่าท่อผิวเรียบซึ่งในช่วงเวลาเริ่มต้นผลิตค่าความต้านทานทางความร้อนที่เกิดจากชั้นความหนายังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก แต่เมื่อเวลาผ่านไปชั้นของน้ำแข็งจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นและส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าอิทธิพลจากลักษณะของผิวท่อ และจะเห็นว่าท่อลักษณะนี้ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อที่มีผิวเรียบในช่วงที่มีค่า Wall Superheat มากๆ แต่เมื่อค่า Wall Superheat มีค่าน้อยลง การถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีผิวขรุขระจะดีกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 6.6

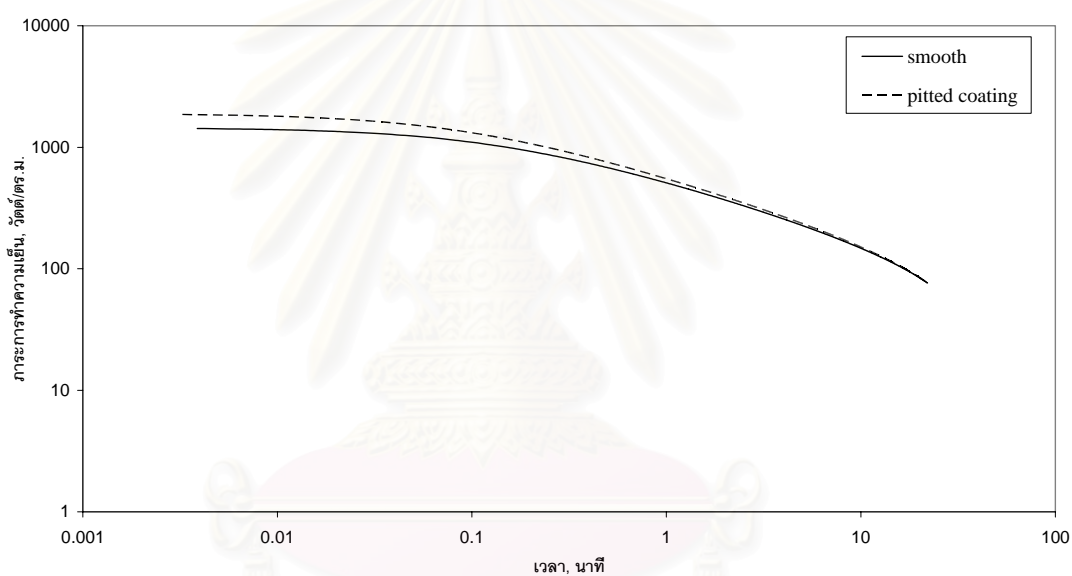


## 6.4 การวิเคราะห์ภาวะความเย็นในขณะสารทำความเย็นมีการเดือดจากการคำนวณทางทฤษฎี

- ค่าภาวะความเย็น

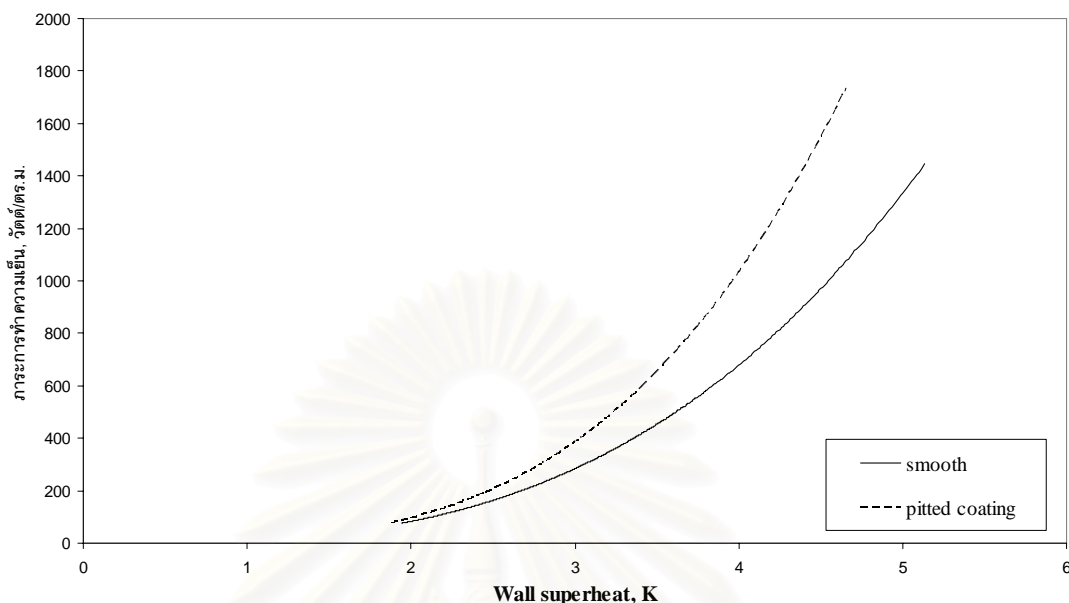
$$q = \alpha_{nb} \Delta T \quad (5.3)$$

ซึ่งจากการคำนวณจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบภาวะความเย็นจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณ

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบภาวะความเย็นจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับ Wall Superheat จากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.7 และ 6.8 จะเห็นว่าค่าภาวะความเย็นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆช้าลง ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวภายนอกของท่อและค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนีย หรือที่เรียกว่า “Wall superheat” ที่มีค่าความแตกต่างค่อยๆน้อยลงเรื่อยๆ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อน้ำแข็งที่มีค่าน้อยลงเรื่อยๆจนใกล้เคียงค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนียซึ่งทำให้ค่าแตกต่างของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นมาจากค่าความหนาของน้ำแข็งที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเช่นกัน ทำให้ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและภาวะความเย็นมีค่าค่อยๆน้อยลง

จากรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าค่าของภาวะความเย็นที่ได้จากท่อที่มีผิวขรุขระจะมีค่ามากกว่าภาวะความเย็นที่ได้จากท่อผิวเรียบโดยเฉพาะในช่วงเริ่มการผลิตจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงท้ายๆของการผลิตจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยประมาณ 1.4 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าสอดคล้องกับรูปที่ 6.7 เนื่องจากที่ช่วงเริ่มการผลิตค่าของ Wall Superheat จะมีค่ามากและน้อยลงเรื่อยๆตามเวลาการผลิต เนื่องการถ่ายเทความร้อนที่ยากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความหนาของน้ำแข็ง และจากรูปจะเห็นว่าที่ Wall Superheat ต่ำๆ ค่าภาวะความเย็นจากท่อทั้งสองแบบจะไม่แตกต่างกันเลย

## 6.5 การวิเคราะห์ห้อัตราการผลิต ณ เวลาต่างๆจากการคำนวณทางทฤษฎี

ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาอัตราการผลิตน้ำแข็งตลอดเปรียบเทียบกับเวลาในการผลิตโดยการคำนวณในทางทฤษฎี ซึ่งขั้นตอนแรกนั้นจำเป็นต้องอัตราการเปลี่ยนแปลงรัศมีของท่อน้ำแข็งเทียบกับเวลา ซึ่งในขั้นตอนนี้จะสามารถหาค่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงรัศมีโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขได้ดังนี้

- ที่เวลาเริ่มต้นการผลิต จะได้

$$\frac{dr(t)}{dt} = \frac{r(t_{i+1}) - r(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (6.2)$$

- ที่ช่วงกลางของการผลิต

$$\frac{dr(t)}{dt} = \frac{r(t_{i+1}) - r(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (6.3)$$

- ที่จุดสิ้นสุดการผลิต

$$\frac{dr(t)}{dt} = \frac{r(t_i) - r(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (6.4)$$

โดย  $i$  คือ ช่วงของเวลาดังแต่ 1, ..., n

- ส่วนอัตราการผลิตจะสามารถหาได้จาก

$$V(t) = \pi l \{ r_1^2 - [r(t)]^2 \} \quad (6.5)$$

โดย

$V(t)$  = ปริมาตรของน้ำแข็งที่เวลาต่างๆ (ลูกบาศก์เมตร)

$r_1$  = รัศมีภายในของท่อน้ำแข็ง ในที่นี้เท่ากับ 35 มิลลิเมตร

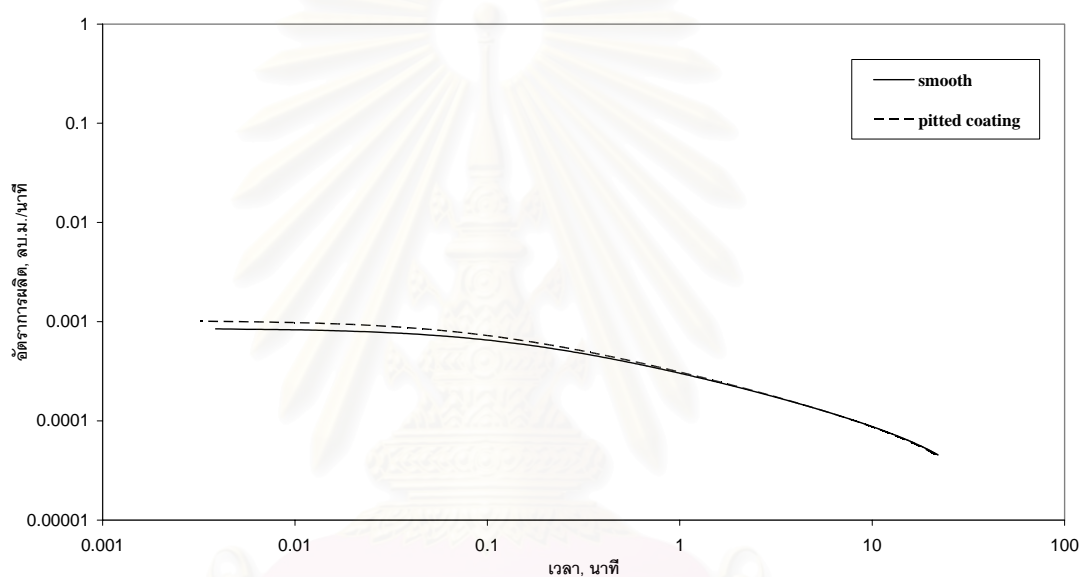
$r(t)$  = รัศมีของท่อน้ำแข็งที่เวลาต่างๆ

$l$  = ความยาวของท่อน้ำแข็ง ในที่นี้เท่ากับ 3 เมตร

ซึ่งจะสามารถอัตราการผลิตได้จากอนุพันธ์เทียบกับเวลาของสมการที่ (5.5) ดังนี้

$$\frac{dV(t)}{dt} = -2\pi r(t) \frac{dr(t)}{dt} \quad (6.6)$$

ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบอัตราการผลิตจากท่อน้ำแข็งผิวเรียบและขรุขระเทียบกับเวลาในการผลิตจากการคำนวณ

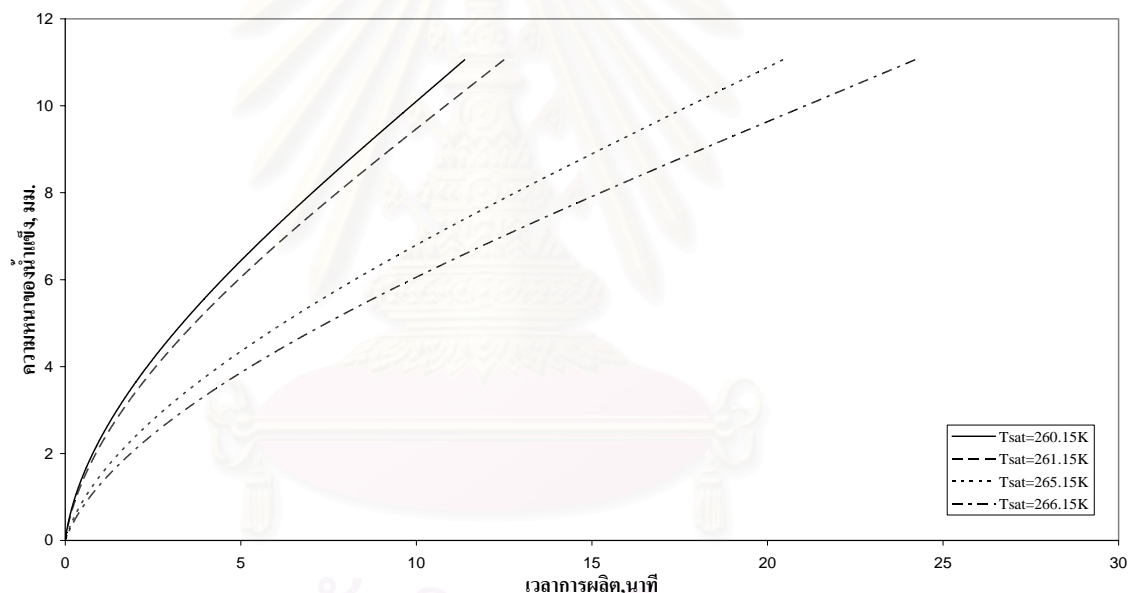
จากรูปที่ 6.9 จะเห็นค่าของอัตราการผลิตจะสูงมากในช่วงแรกของการผลิตและจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก โดยที่หลังจากนั้นจะค่อยๆลดลงจนเกือบคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับค่าของภาวะความเย็นที่จะลดลงในช่วงท้ายของการผลิต โดยมีผลจากการเพิ่มขึ้นของความหนาของน้ำแข็งซึ่งจะเป็นการเพิ่มความต้านทานการถ่ายเทความร้อนนั่นเอง

จากรูปที่ 6.9 จะเห็นค่าอัตราการผลิตน้ำแข็งที่ได้จากท่อที่มีผิวขรุขระจะมีค่าที่สูงกว่าอัตราการผลิตที่ได้จากท่อผิวเรียบในช่วงแรกของการผลิตน้ำแข็ง ซึ่งหลังจากนั้นก็จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยค่าอัตราการผลิตจากท่อที่มีผิวขรุขระจะสูงกว่าอยู่เล็กน้อยโดยเฉลี่ยตลอดการผลิตประมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วงแรกของการผลิตนั้นค่าภาวะความร้อนที่

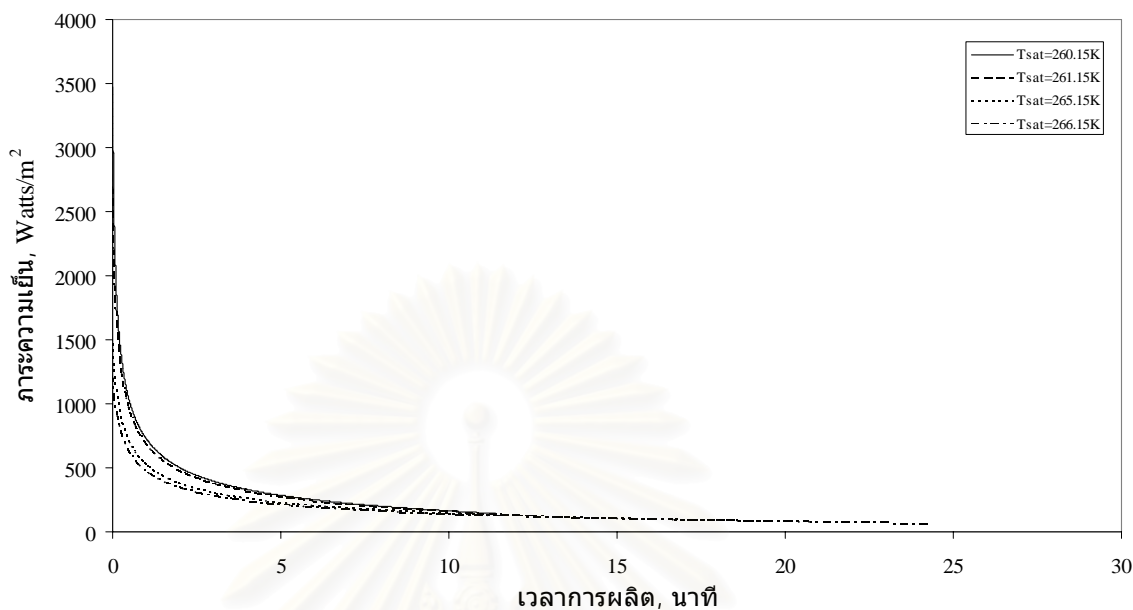
ถ่ายเทระหว่างน้ำและแอมโมเนียผ่านท่อผิวขรุขระนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ ดังนั้นในช่วงแรกจะมีอัตราการผลิตที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ และในช่วงหลังจากนั้นค่าภาวะความเย็นของท่อทั้งสองแบบจะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก อัตราการผลิตน้ำแข็งที่ได้จากท่อทั้งสองแบบจึงไม่แตกต่างกันมากนัก

## 6.6 การวิเคราะห์ผลเนื่องจากค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนีย

การวิเคราะห์นี้เพื่อหาผลกระทบจากค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนียที่มีผลค่าภาวะความร้อนและอัตราการผลิตน้ำแข็ง ซึ่งผลจากการคำนวณทางทฤษฎีบนท่อผิวเรียบจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 6.10 ความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาการผลิตที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆของแอมโมเนียของแอมโมเนีย



รูปที่ 6.11 ภาวะความเย็นเทียบกับเวลาการผลิตที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆของแอมโมเนีย

จากรูปที่ 6.10 และ 6.11 จะเห็นว่าที่ค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนียมีค่าต่ำจะให้ทั้งค่าภาวะความเย็นและอัตราการผลิตที่สูงกว่าที่อุณหภูมิอิ่มตัวมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ค่าอุณหภูมิอิ่มตัวต่ำนั้นจะทำให้ค่า Wall Superheat ยังมีค่ามาก ซึ่งส่งผลให้ค่าภาวะความเย็นและอัตราการผลิตมีค่าสูงตามไปด้วย โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบต่อระบบทำความเย็นโดยรวมซึ่งผลที่ได้นี้อาจจะทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นได้ และหากพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าของ  $C_s$  แล้วจะพบว่าจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่ำๆเช่นกัน ซึ่งถือเป็นส่วนที่ช่วยให้ทั้งค่าภาวะความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งนั้นมีค่าสูงขึ้น และสำหรับท่อผิวขรุขระนั้นก็จะให้ผลในลักษณะเดียวกัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการที่อุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนียต่ำลงจะให้ค่าของสมรรถนะทางความร้อน (COP) ของระบบต่ำลงไปด้วย



## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดเพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจากอัตราการผลิตและภาวะความเย็นเมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างการตรวจวัดภาคสนามในโรงงานอุตสาหกรรมทำน้ำแข็งหลอด และการคำนวณจากทางทฤษฎี ซึ่งจากการตรวจวัดในภาคสนามนั้นจะเห็นว่ากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในคาบเวลาช่วงสั้นๆ ประมาณ 20 ถึง 30 นาทีต่อรอบการผลิต ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งหลอดสู่สารทำความเย็น (แอมโมเนีย) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ในระหว่างการทำความเย็นนั้น สารทำความเย็นภายในเครื่องระเหยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอโดยการเดือด ซึ่งคุณสมบัติของแอมโมเนียที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดจะใช้ที่อุณหภูมิอิ่มตัว  $-7.55$  องศาเซลเซียส โดยในการศึกษาทางทฤษฎีนั้น จะมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นคือ กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นแบบ Quasi-steady ใน 1 เมตร และความหนาของน้ำแข็งเป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งสามารถสรุปงานวิจัยได้ดังนี้

1. รูปแบบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาของระบบสมการและกระบวนการคำนวณซ้ำ ความหนาของน้ำแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาจะประมาณได้จากเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำแข็ง โดยผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าจากภาคสนามและการคำนวณจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันในเชิงคุณภาพ
2. ค่าความหนาของน้ำแข็งจะโตขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการผลิต และจะโตขึ้นช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาของน้ำแข็งจะมีค่ามากในช่วงแรกของการผลิตแล้วจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ระดับความหนาเดียวกันท่อที่มีผิวขรุขระจะให้เวลาในการผลิตเร็วกว่าท่อผิวเรียบประมาณ 40.2 วินาที หรือประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความหนาของน้ำแข็งนี้จะมีผลอย่างมากต่อค่าภาวะความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ

3. อุณหภูมิผิวภายนอกของท่อน้ำแข็งในช่วงเวลาเริ่มแรกจะมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของน้ำและจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนมาใกล้กับค่าอุณหภูมิอิมตัวของแอมโมเนีย และค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อผิวขรุขระนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อผิวเรียบอยู่เล็กน้อย ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ตลอดช่วงเวลากการผลิต
4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะสารทำความเย็นมีการเดือดและค่าภาวะความเย็นจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเริ่มการผลิตและจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการผลิต และจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆเมื่อเวลาผ่านไปจนเกือบจะคงที่เมื่อเข้าสู่ช่วงท้ายของการผลิต หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะสารทำความเย็นมีการเดือดจะมีค่าสูงเมื่อค่า Wall Superheat มีค่ามาก และจะมีค่าต่ำเมื่อค่า Wall Superheat มีค่าน้อย
5. ค่าของภาวะความเย็นและค่าอัตราการผลิตน้ำแข็งจะมีค่าสูงในช่วงแรกของการผลิตและจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนอัตราการผลิตเกือบที่จะคงที่เมื่อใกล้สิ้นสุดการผลิต โดยค่าที่ได้จากท่อที่มีผิวขรุขระจะมีค่ามากกว่าภาวะความเย็นที่ได้จากท่อผิวเรียบโดยเฉพาะ ในช่วงเริ่มการผลิตจะมีค่าสูงกว่ามากแต่ในช่วงท้ายๆของการผลิตจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งค่าภาวะความเย็นและอัตราการผลิตที่ ณ เวลาต่างๆ ของท่อที่มีผิวขรุขระจะมีค่าสูงกว่าท่อที่มีผิวเรียบเฉลี่ยตลอดกระบวนการผลิตที่ประมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์ และค่าอุณหภูมิอิมตัวของแอมโมเนียมีค่าต่ำจะให้ทั้งค่าภาวะความเย็นและอัตราการผลิตที่สูงกว่าที่อุณหภูมิอิมตัวมีค่าสูง แต่จะทำให้ค่าสมรรถนะทางความร้อน (COP) ของกระบวนการผลิตมีค่าลดลง
6. ท่อที่มีผิวขรุขระจะให้ผลของการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อที่มีผิวเรียบในช่วงที่มีค่า Wall Superheat มากๆ แต่เมื่อค่า Wall Superheat มีค่าน้อยลง การถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีผิวขรุขระจะดีกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดในภาคสนามมีข้อจำกัดหลายด้านๆ ทำให้อาจจะมีข้อผิดพลาดในการวัดพอสมควรอีกทั้งซึ่งเมื่อทำการพิจารณาในช่วงเริ่มของการผลิตนั้นค่าเริ่มต้นต่างๆของน้ำเช่น อุณหภูมิเริ่มต้นในการแข็งตัวของน้ำซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจจะไม่ได้อยู่ที่ค่า  $0^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากน้ำที่ใช้ผลิตอาจจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจาก

การใช้ก๊าซร้อนในการละลายน้ำแข็ง ซึ่งไม่ได้เป็นไปดังค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้ในทางทฤษฎีทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีนั้นมีความผิดพลาดสูงในช่วงแรกของการผลิต

2. เนื่องจากการคำนวณทางทฤษฎีในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ตั้งอยู่บนสมมติฐานของสภาวะคงที่ (Steady State) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วระบบการผลิตน้ำแข็งไม่ได้อยู่ในสภาวะคงที่ ซึ่งทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการทำงานจริงของระบบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของภาวะความเย็นและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในการวิจัยต่อไปควรมีการประยุกต์วิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาลักษณะเช่นนี้ได้ดียิ่งขึ้นเพื่อลดข้อผิดพลาดลง เช่นมีการวัดค่าความดันในถังเก็บแอมโมเนียด้วยเพื่อให้สามารถระบุคุณสมบัติของแอมโมเนียที่สภาวะนั้นๆ ได้ดีขึ้น เนื่องจากอาจจะเกิดความผิดพลาดหากมีการใช้ค่าความดันที่วัดจากด้านดูดเข้าเครื่องอัดไอน์มาใช้แทนในการคำนวณ
3. ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในขณะสารทำความเย็นมีการเดือดบนพื้นผิวขรุขระที่ได้มาใช้นั้นได้มีข้อจำกัดหลายๆอย่าง ทั้งทางด้านของชนิดของสารทำความเย็น, วิธีการตกแต่งผิวและสภาวะการทำงานของสารทำความเย็น ดังนั้นหากมีการประยุกต์ใช้กับปัญหาในลักษณะอื่นๆควรมีการตรวจสอบข้อจำกัดของความสัมพันธ์เหล่านี้ก่อน เนื่องจากอาจจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจจะให้มีการสร้างชุดทดสอบจำลองรูปแบบปัญหาในลักษณะเดียวกับงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อทำการสร้างความสัมพันธ์สำหรับปัญหานี้ให้ได้ดียิ่งขึ้น
4. ควรมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้และภาวะความเย็นของกระบวนการผลิตน้ำแข็งตลอด ซึ่งจะสามารถคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตน้ำแข็งตลอดต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

รจนา ประไพพนพ. การจำลองแบบการขึ้นรูปของน้ำแข็งโดยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม. วิทยานิพนธ์  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545.

อินทรชิต หอวิจิตร. อุณหพลศาสตร์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2540.

### ภาษาอังกฤษ

Bergles E. High-flux process through enhanced heat transfer.  
[web.mit.edu/html/www/papers/BERGLES.pdf](http://web.mit.edu/html/www/papers/BERGLES.pdf)

Carslow and Jaeger. Conduction of heat in solids. 2<sup>nd</sup>ed. Oxford University Press,  
1959.

Janusz T. and Cieslinski. Nucleation pool boiling on porous metallic coatings.  
Experimental Thermal and Fluid science. 25 (2002): 557-564.

Jiang Y. Y., et al. Boiling heat transfer on machined porous surfaces with structure  
optimization. Int. J. Heat and Mass Transfer. 44 (2001): 443-456.

Luke A. and Golenflo D. Heat transfer and size distribution of active nucleation sites  
in boiling propane outside a tube. Int. J. Therm. Sci. 39 (2000): 919-930.

Mertz R., et al. Pool boiling of butane from enhanced tubes. [www-ew.ike.uni-stuttgart.de/papers/bru97.pdf](http://www-ew.ike.uni-stuttgart.de/papers/bru97.pdf)

Mertz R., et al. Pool boiling from enhanced tubular heat transfer surfaces. [www-ew.ike.uni-stuttgart.de/papers/kyon98.pdf](http://www-ew.ike.uni-stuttgart.de/papers/kyon98.pdf)

Mertz R. and Groll M. Pool boiling of propane from enhanced evaporator tubes.  
[www-ew.ike.uni-stuttgart.de/papers/gren2002-mertz.pdf](http://www-ew.ike.uni-stuttgart.de/papers/gren2002-mertz.pdf)

Nishikawa K. and T. Ito. Augmentation of nucleate boiling heat transfer by prepared  
surfaces. in T. Mizushima and W. J. Yang, Heat transfer in energy problem,  
111-18. Washington, D.C.: Hemisphere, 1982.

- Ozisik M. N. Heat transfer a basic approach. New York.: McGraw-Hill, 1985.
- Pekeris L. C. and Slichter H. L. Problem of ice formation. Journal of applied physics. 10 (1939): 135-137.
- Poulikakos D. Conduction heat transfer. New Jersey: Prentice-Hall International, 1994.
- Scurlock R. G. Enhanced boiling heat transfer surfaces. Institute of Cryogenics, Southampton: University of Southampton, 1995.
- Shou-Shing H. and Chun-Jen W. Nucleate pool boiling from coated surfaced in saturated R-134a and R-407c. Int. J. Heat and Mass Transfer. 40 (1997): 519-532.
- Stoecker W. F. Industrial refrigeration handbook. New York: McGraw-Hill, 1998.
- Stoecker W. F., and Jones W. J. Refrigeration & Air conditioning. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 1982.
- Thome J. R. Enhanced boiling heat transfer. New York: Hermisphere Publishing Corporation, 1990.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร:  
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

### ภาษาอังกฤษ

Corberan J. M. and Gonzalvez J. Two-phase heat transfer analysis of evaporators.  
Experimental Thermal and Fluid science. 26 (2002): 259-267.

Jordan R. C. and Priester G. B. Refrigeration and air conditioning. 2<sup>nd</sup> ed. NJ.:  
Prentice-Hall, 1956.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการตรวจวัดภาคสนาม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ข้อมูลภาคสนาม

จากการตรวจวัดเก็บข้อมูลภาคสนาม ณ โรงงานน้ำแข็งหลอด ห้างหุ้นส่วน สีนทิพย์ จำกัด โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- วันที่ 28 สิงหาคม พุทธศักราช 2547
- กำลังการผลิตเครื่องทำน้ำแข็ง 30 ตันต่อวัน
- เวลารอบการผลิต 28 นาทีต่อรอบ
- ทำการวัดค่าช่วงละ 5 นาที

โดยมีรายละเอียดการตรวจวัด ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลภาคสนาม

หลอดน้ำแข็งที่	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดทำน้ำแข็ง (มิลลิเมตร)						
	ช่วงเวลาที่ (นาที)						
	0	5	10	15	20	25	28
1	9.90	9.50	7.50	6.05	5.75	4.80	3.70
2	9.90	9.05	7.65	6.15	5.10	4.25	3.60
3	9.90	8.90	7.30	5.90	4.55	3.95	3.65
4	9.90	9.35	7.60	6.30	4.25	3.80	3.60
5	9.90	8.80	7.55	6.45	4.95	4.10	3.65
<b>เฉลี่ย</b>	9.90	9.12	7.52	6.17	4.92	4.18	3.64

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลภาคสนามเมื่อมีการปรับแก้จากหัววัดโดยคูณค่าคงที่ 3.538

หลอดน้ำแข็งที่	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดทำน้ำแข็ง (มิลลิเมตร)						
	ช่วงเวลา (นาทีก)						
	0	5	10	15	20	25	28
1	35.03	33.62	26.54	21.41	20.35	16.98	13.09
2	35.03	32.02	27.07	21.76	18.05	15.04	12.74
3	35.03	31.49	25.83	20.88	16.10	13.98	12.92
4	35.03	33.08	26.89	22.29	15.04	13.45	12.74
5	35.03	31.14	26.72	22.82	17.52	14.51	12.92
<b>เฉลี่ย</b>	35.03	32.27	26.61	21.83	17.41	14.79	12.88

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ

หลอดน้ำแข็งที่	ความหนาน้ำแข็ง (มิลลิเมตร)						
	ช่วงเวลา (นาทีก)						
	0	5	10	15	20	25	28
1	0.00	0.69	4.23	6.80	7.33	9.01	10.95
2	0.00	1.49	3.97	6.62	8.48	9.98	11.13
3	0.00	1.75	4.58	7.06	9.45	10.51	11.04
4	0.00	0.96	4.05	6.35	9.98	10.78	11.13
5	0.00	1.93	4.14	6.09	8.74	10.25	11.04
<b>เฉลี่ย</b>	0.00	1.36	4.20	6.58	8.80	10.10	11.06

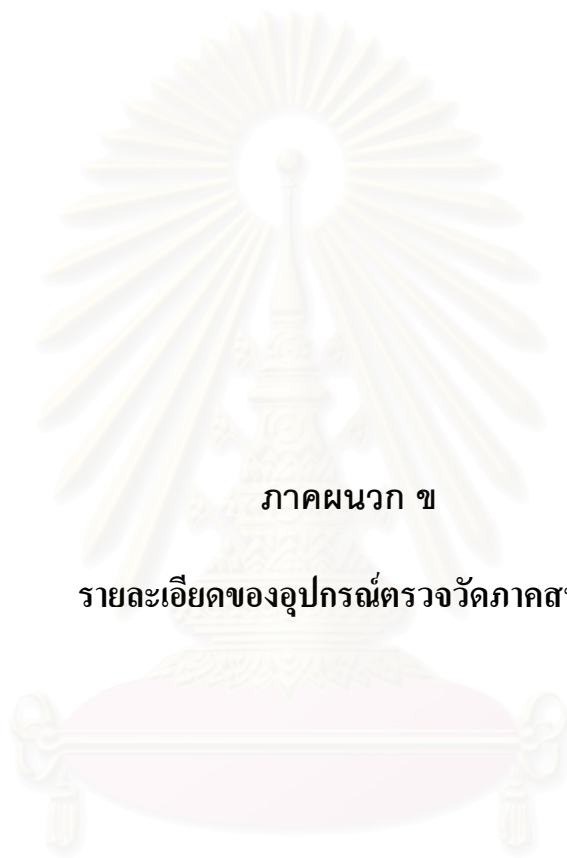
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลความดันขาเข้าและออกเครื่องอัดไอ

ผลการวัด	ตำแหน่งการวัด	
	ขาเข้า	ขาออก
ความดันเกจ, MPa	0.22	1.85

โดยความดันบรรยากาศอยู่ที่ 0.10135 MPa



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

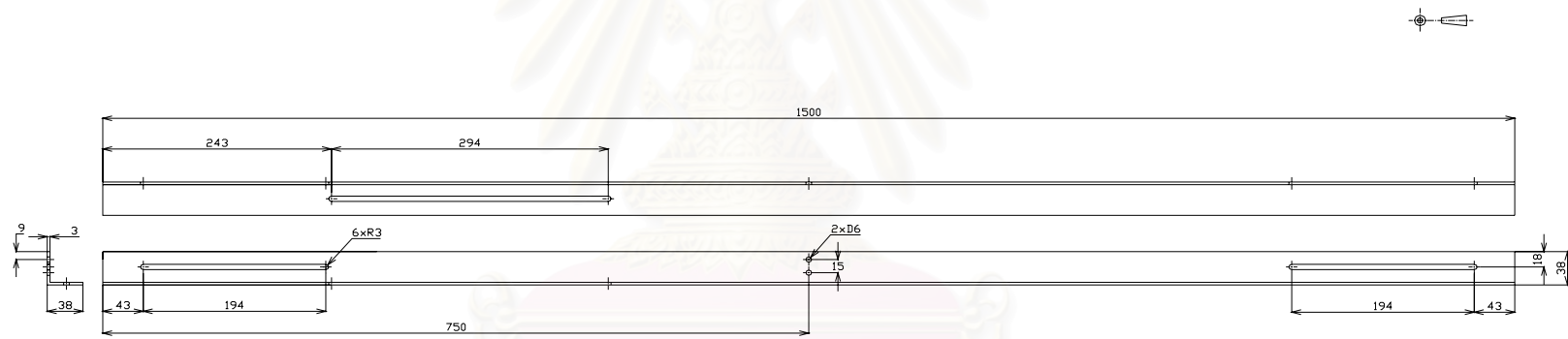


ภาคผนวก ข

รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

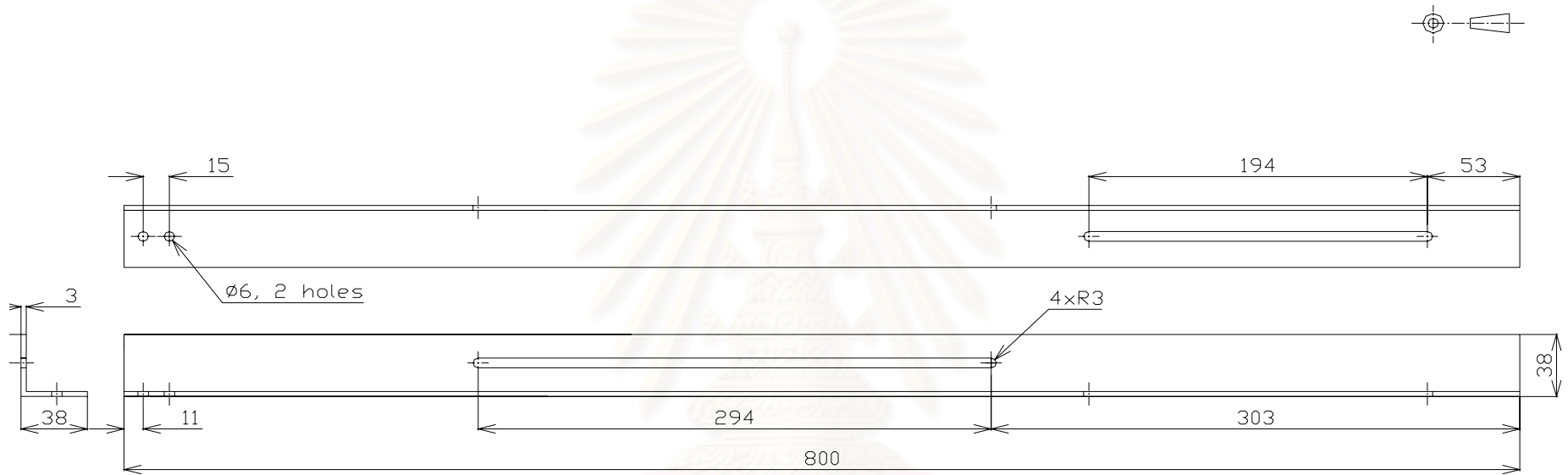




Notes:  
All dimensions are in millimeters.

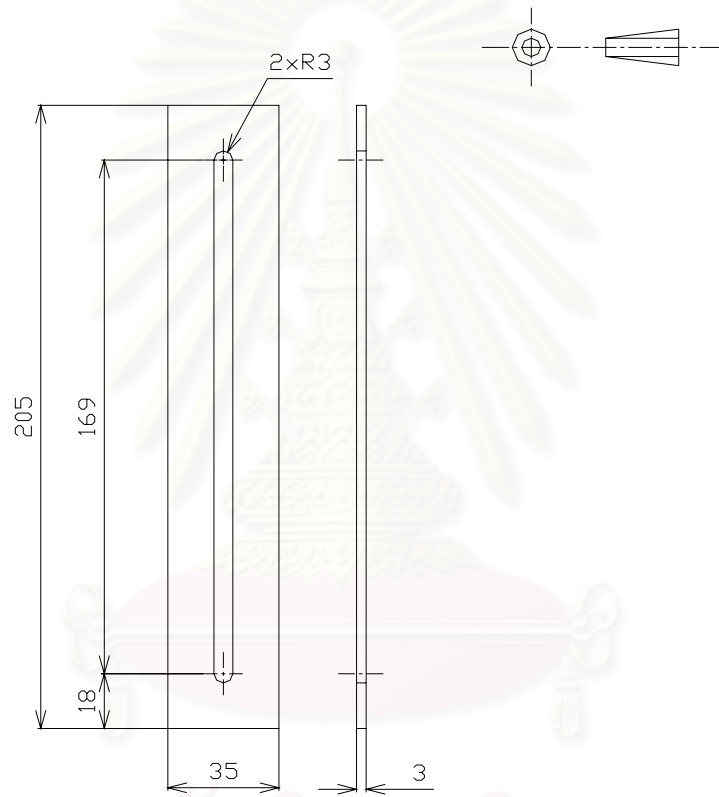
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข.1 ชุดโครงยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งชั้นที่ 1



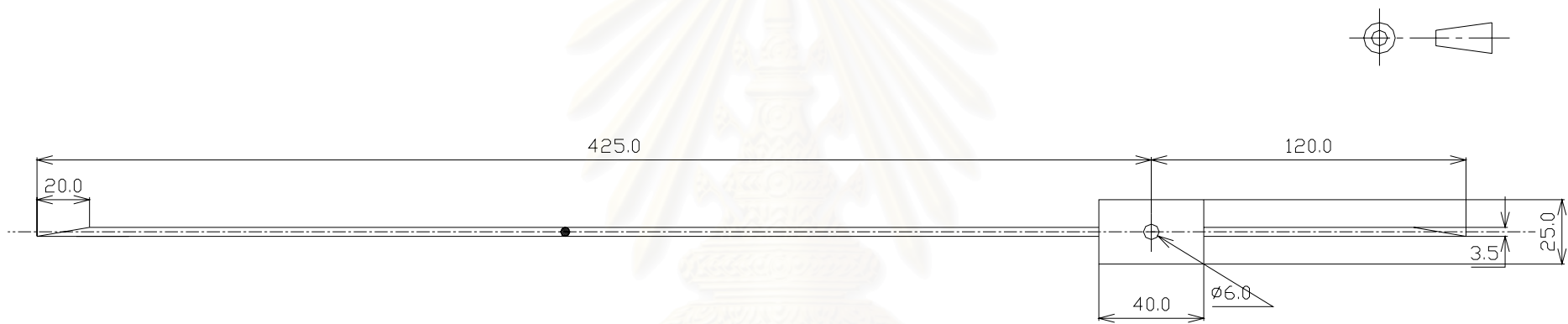
Notes:  
All dimensions are in millimeters.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ ข.2 ชุดโครงยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็งชั้นที่ 2



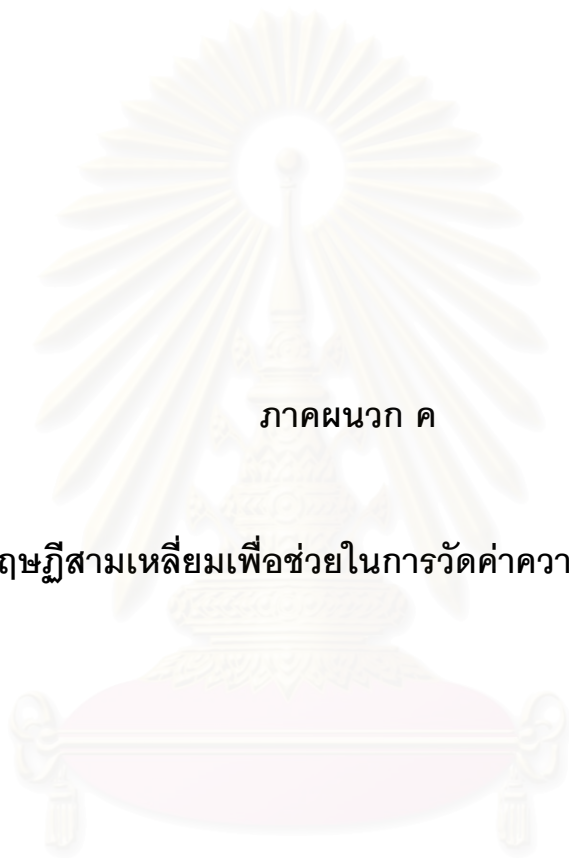
Notes:  
All dimintions sre in millimeters.

รูปที่ ๑.3 เหล็กยึดหัววัดกับ โครงจับยึดขอบเครื่องทำน้ำแข็ง



Notes:  
All dimensions are in millimeters

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ ข.4 หัววัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด

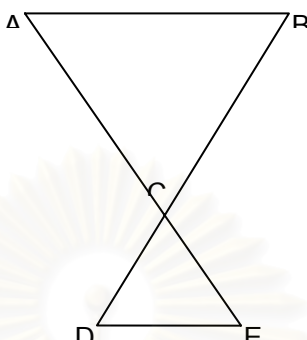


ภาคผนวก ค

การใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมเพื่อช่วยในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การใช้ทฤษฎี 3 เหลี่ยมเพื่อช่วยในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง



รูปที่ ค.1 แสดงความสัมพันธ์ของ 3 เหลี่ยมคล้าย

จากนิยามของ 3 เหลี่ยมคล้าย

1. ด้านคู่ที่สมนัยกัน คือ ด้านคู่ที่อยู่ตรงข้ามมุมที่เท่ากัน
2. ถ้าสามเหลี่ยมสองรูปคล้ายกัน อัตราส่วนของด้านที่สมนัยกันจะเท่ากัน
3. ถ้าอัตราส่วนของด้าน 3 คู่ของสามเหลี่ยมสองรูปใด ๆ มีค่าเท่ากัน แล้วสามเหลี่ยมสองรูปนั้นจะคล้ายกัน

จากรูปที่ ค.1 สรุปได้ว่า  $\Delta ABC \sim \Delta DEC$  และสามารถสรุปได้ว่า ถ้ารูปสามเหลี่ยมสองรูปใดคล้ายกัน อัตราส่วนของความยาวของด้านคู่ที่อยู่ตรงข้ามกับมุมที่มีขนาดเท่ากันจะเท่ากัน ซึ่งจะสรุปได้ว่า

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{DE}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{EC}} = \frac{\overline{CA}}{\overline{CD}} \quad (\text{ค.1})$$

ดังนั้นจากเครื่องมือวัดที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นเมื่อนำมาใช้กับทฤษฎีของ 3 เหลี่ยมเพื่อหาว่าค่าความกว้างของท่อที่ปลายอีกด้านหนึ่งวัดได้จริงเท่าไรนั้นเมื่อทำการอ่านค่าจากปลายทางด้านบน เมื่อเทียบกับรูปที่ ค.1 จะได้ว่า



$$\overline{CA} = 42.5 \text{ cm.}$$

$$\overline{CD} = 12 \text{ cm.}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{\overline{CA}}{\overline{CD}} = 3.538$$

(ค.2)

ซึ่งค่าที่ได้นี้จะนำมาใช้เป็นค่าปรับแก้ในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็งที่วัดได้จากชุด  
หัววัดที่ประดิษฐ์ขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าคงที่ C

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวเรียบ อุณหภูมิอิ่มตัว  
( $T_{sat}$ ) เท่ากับ  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$

โดยในที่นี้ได้เลือกใช้สารทำความเย็นคือ แอมโมเนีย โดยกำหนดให้อุณหภูมิอิ่มตัว ( $T_{sat}$ )  
เท่ากับ  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $260.15\text{ K}$

จากสมการที่ (3.8)

$$\begin{aligned}\frac{\alpha_{nb}d}{k_L} &= 0.0546 \left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \left( \frac{qd}{k_L T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \left( \frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{0.248} \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33} \\ &= 0.0546 \left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \right]^{0.67} \left( \frac{qd}{k_L T_{sat}} \right)^{0.67} \left( \frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right) \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33}\end{aligned}\quad (3.8)$$

และจากสมการที่ (3.9) เราจะใช้ค่า  $\beta = 35^{\circ}$

$$d = 0.0146\beta \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{1/2}\quad (3.9)$$

เมื่อเราแทนค่าต่างๆลงไปในสมการที่ (3-9) เราจะได้

$$d = 1.53 \times 10^{-3}\text{ m}$$

เมื่อเราพิจารณาเทอมทางขวามือของสมการที่ (3.8) เราจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \right]^{0.67} &= 0.1497 \\ \left( \frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{-0.248} &= 2832.0366 \\ \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33} &= 1.0151\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่ากลับลงไปในสมการที่ (3.8) จะได้

$$\frac{\alpha_{nb} d}{k_L} = 23.52 \left( \frac{q d}{k_L T_{sat}} \right)^{0.67} \quad (ง.1)$$

โดยที่ค่า

$$q = \alpha_{nb} \Delta T \quad (5.3)$$

โดย

$$\Delta T = T_w - T_{sat} \quad (5.4)$$

แทนสมการที่ (5.3) ลงในสมการที่ (ง.1) เราจะได้ว่า

$$\frac{\alpha_{nb} d}{k_L} = 23.52 \left( \frac{\alpha_{nb} \Delta T \cdot d}{k_L T_{sat}} \right)^{0.67} \quad (ง.2)$$

ทำการจัดรูปของตัวแปรทั้งสองข้างสมการจะได้

$$\alpha_{nb} = 5.424 \times 10^6 \left( \frac{\Delta T}{T_{sat}} \right)^{2.0303} \quad (ง.3)$$

ดังนั้นเราจะให้

$$C = 5.424 \times 10^6 \quad \text{ที่อุณหภูมิอิ่มตัวที่ } -13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ซึ่งค่าของ C พร้อมค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิอิ่มตัวอื่นๆ สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้  
ตาราง ง.1 สรุปค่า C ของแอมโมเนียที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆ

อุณหภูมิอิ่มตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )	-7	-7.55	-8	-12	-13
คุณสมบัติ					
$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	648.005	648.72	649.305	654.505	655.805
$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.766	2.720	2.683	2.347	2.263
$\Delta h_v$ (kJ/kg)	1285.513	1287.3	1288.763	1301.763	1306.615
$k_L$ (mW/m.K)	573.428	574.06	574.578	579.178	580.338
$a_L$ (m <sup>2</sup> /s) *10 <sup>-7</sup>	1.892	1.895	1.897	1.916	1.92
$\sigma$ (mN/m)	27.786	27.912	28.016	28.936	29.166
$C * 10^6$	6.722	6.596	6.496	5.624	5.424



ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าคงที่  $C_r$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวขรุขระ อุณหภูมิอิ่มตัว  
( $T_{sat}$ ) เท่ากับ  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$

โดยในที่นี้ได้เลือกใช้สารทำความเย็นคือ แอมโมเนีย โดยกำหนดให้อุณหภูมิอิ่มตัว ( $T_{sat}$ )  
เท่ากับ  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $260.15\text{ K}$

จากสมการที่ (5.6)

$$\frac{C_{pL}\Delta T}{\Delta h_v} = 0.137 \left[ \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \right]^{0.292} \left[ \frac{\eta}{\delta} \right]^{-0.190} \left[ \frac{\mu_L^2}{\eta \rho_L \sigma} \right]^{0.065} \quad (จ.1)$$

เมื่อเราพิจารณาเทอมของสมการที่ (จ.1) แทนค่าคุณสมบัติต่างๆของแอมโมเนียลงไปและเลือกใช้  
ค่า  $\varepsilon = 0.5$ ,  $\eta = 1\text{ }\mu\text{m}$  และ  $\delta = 250\text{ }\mu\text{m}$  เราจะได้ดังนี้

$$\frac{C_{pL}\Delta T}{\Delta h_v} = 0.003482(\Delta T) \quad (จ.2)$$

$$\left( \frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \right)^{0.292} = 0.004163(q)^{0.292} \quad (จ.3)$$

$$\left( \frac{\mu_L^2}{\eta \rho_L \sigma} \right)^{0.065} = 0.676992 \quad (จ.4)$$

$$\left( \frac{\eta}{\delta} \right)^{-0.190} = 2.855 \quad (จ.5)$$

เมื่อแทนค่า (จ.2) ถึง (จ.5) กลับลงไปนสมการที่ (จ.1) จะได้

$$\Delta T = 0.3165857(q)^{0.292} \quad (จ.6)$$



โดยที่ค่า

$$q = \alpha_{nb} \Delta T \quad (จ.7)$$

โดย

$$\Delta T = T_w - T_{sat} \quad (จ.8)$$

แทนสมการที่ (จ.7) ลงในสมการที่ (จ.6) เราจะได้ว่า

$$\Delta T = 0.3165857(\alpha_{nb} \Delta T)^{0.292} \quad (จ.9)$$

ทำการจัดรูปของตัวแปรทั้งสองข้างสมการจะได้

$$\alpha_{nb} = 51.366(\Delta T)^{2.42457} \quad (จ.10)$$

ดังนั้นเราจะให้

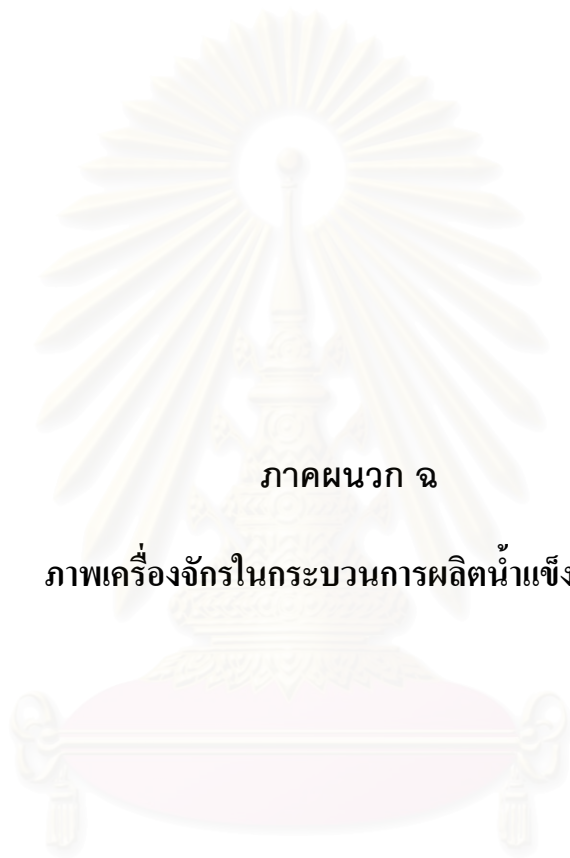
$$C_r = 51.366 \text{ ที่อุณหภูมิอิ่มตัวที่ } -13 \text{ }^\circ\text{C}$$

ซึ่งค่าของ  $C_r$  พร้อมค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิอิ่มตัวอื่นๆ สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง จ.1 สรุปค่า  $C_r$  ของแอมโมเนียที่อุณหภูมิอิ่มตัวต่างๆ

อุณหภูมิอิ่มตัว ( $^\circ\text{C}$ )	-7.55				-13
	คุณสมบัติ				
$\rho_L$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	648.72	648.72	648.72	648.72	655.805
$C_{pL}$ ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	4.569	4.569	4.569	4.569	4.549
$\Delta h_v$ ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	1287.3	1287.3	1287.3	1287.3	1306.615
$\mu_L$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $\cdot 10^{-6}$	202.32	202.32	202.32	202.32	217.58
$\sigma$ ( $\text{mN}/\text{m}$ )	27.912	27.912	27.912	27.912	29.166
$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	100	100	250	250	250
$\eta$ ( $\mu\text{m}$ )	1	10	1	1	1
$\varepsilon$	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5
$C_r$	93.076	69.522	51.275	82.039	51.366

ซึ่งในงานวิจัยนี้เราจะเลือกใช้ค่า  $\varepsilon = 0.5$ ,  $\eta = 10 \mu\text{m}$  และ  $\delta = 100 \mu\text{m}$  ในการทำการเปรียบเทียบที่ท่อผิวเรียบ



ภาคผนวก ฉ

ภาพเครื่องจักรในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



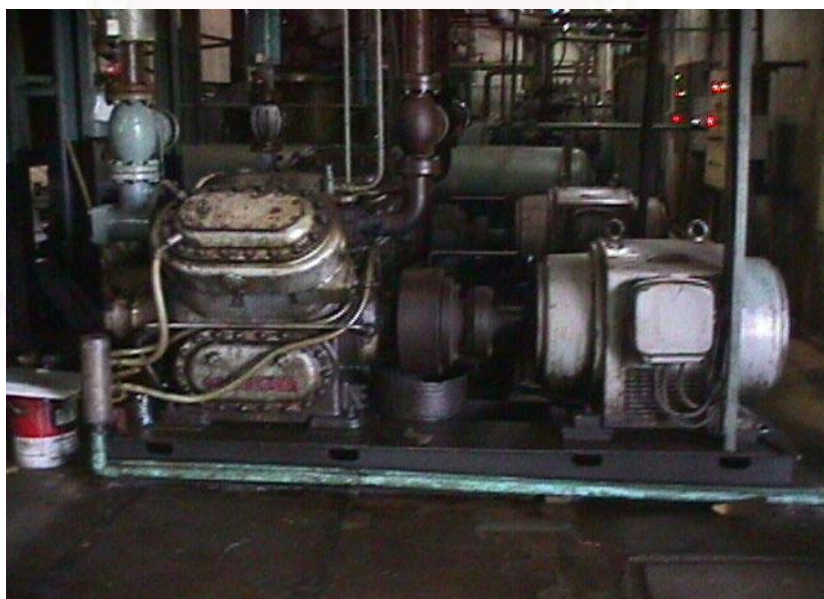
รูปที่ จ.1 เครื่องทำน้ำแข็งหลอด



รูปที่ จ.2 ถังเก็บแอมโมเนีย



รูปที่ น.3 ถังแยกน้ำมัน



รูปที่ น.4 เครื่องอัดไอ





รูปที่ ๓.5 เครื่องควบแน่น



รูปที่ ๓.6 ถังเก็บน้ำดิบ



รูปที่ น.7 ด้านบนเครื่องทำน้ำแข็งหลอด



รูปที่ น.8 แผงหน้าปัดควบคุมเครื่องทำน้ำแข็งหลอด



ภาคผนวก ซ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับท่อผิวเรียบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



```

Program smoothtube;
uses wincrt;
var    aa,b,c,d,e,f,thick,step,iii,con1 : real;
        q,r0,r1,r2,rt,k1,k2,dt,y : real;
        twi,tsat,two,time,hnb,lo,L : real;
        smooth2 : text;

Procedure inprop;
{Input properties of ammonia at sat.temp.and find constant}

var    one,too,three,four,five,con : real;
        lol,lov,hv,kl,al,beta,sigma,departure : real;

begin

    writeln('Please input properties of ammonia');
    write('Saturated temperature(K) = ');readln(tsat);
    write('Density of liquid(kg/m3) = ');readln(lol);
    write('Density of vapor(kg/m3) = ');readln(lov);
    write('Heat Of vaporization(J/kg) = ');readln(hv);
    write('Conductivity of liquid(W/m.K) = ');readln(kl);
    write('Diffusivity of liquid(m2/s) = ');readln(al);
    write('Surface tension (N/m) = ');readln(sigma);
    write('Contact angle(deg.) = ');readln(beta);

    departure:=0.0146*beta*(exp(0.5*ln(2*sigma/(9.81*(lol+lov)))));
    one:=exp(0.67*ln(exp(0.5*ln(lov/lol))));
    too:=exp(0.248*ln(hv*exp(2*ln(departure))/exp(2*ln(al))));
    three:=exp(-4.33*ln((lol-lov)/lol));
    four:=0.0546*one*too*three;
    five:=exp((1/0.33)*ln(four));
    con:=five*(kl/departure);
    con1:=con*(exp(-6*ln(10)));

end;

Procedure newton;
{For find [two-tsats]}

var    x0,es,x,f,df,dx,tol,a : real;
        iter : integer;

    Function func(x:real) : real;
    begin
    func:=exp(3.0303*ln(x))-x/(r2*c*a)+(twi-tsats)/(r2*c*a);
    end;

    Function deriv(x:real) : real;
    begin
    deriv:=3.0303*exp(2.0303*ln(x))-1/(r2*c*a);
    end;

begin

a:= -1*((1/k1)*ln(r1/y)+(1/k2)*ln(r2/r1));
x0:=5;
es:=0.001;

```

```

        x:=x0;

repeat
    f:=func(x);
    df:=deriv(x);
    dx:=-f/df;
    x:=x+dx;
    tol:=abs(dx*100/x);

until tol<es;

    dt:=x;
    {dt=two-tsat}
end;

Procedure input;

begin

    write('OR of tube(m) = ');readln(r2);
    write('IR of tube(m) = ');readln(r1);
    write('Conductivity of ice(W/m.K) = ');readln(k1);
    write('Density of ice (kg/m3) = ');readln(lo);
    write('Latent heat of water(J/kg) = ');readln(L);
    write('Conductivity of tube(W/m.K) = ');readln(k2);
    write('Least R of hole of ice(m){max.thick} = ');readln(r0);
    write('Step of ice growth rate(m) = ');readln(step);

    twi:= 273.15; {0 C}
    c:=(con1*exp(6*ln(10)))/(exp(2.0303*ln(tsat)));

end;

Procedure heatcoeff;
{Find nucleate boiling heat transfer coefficient}

begin
    hnb:= c*exp(2.0303*ln((two-tsat)));
end;

Procedure tempwallout;
{Find temperature on outside surface of tube}

begin
    newton;
    two:=tsat+dt;

end;

Procedure heatrate;
{Find heat flow from inside of tube to refrigerant}

begin
    aa:= exp((1/k1)*ln(r1/r0));

```

```

b:= exp((1/k2)*ln(r2/r1));
d:= 2*pi*(twi-tsat);
e:= ln(aa*b);
f:= 1/(r2*hnb);
q:= d/(e+f);

```

```
end;
```

```
Procedure simpson;
```

```
label 50,100;
```

```
var start,final,h,sum1,sum2,fy,fy0,fyn,sol : real;
m,n,j : integer;
```

```
Function frt(y:real): real;
```

```
begin
```

```
frt:=y/(hnb*r2);
```

```
end;
```

```
begin
```

```

start:=r0;
final:=r1;
n:=100;
m:=n-trunc(n/2)*2;
if m=0 then goto 50;
goto 100;
50 : h:=(final-start)/n;
sum1:=0;
y:=start+h;
j:=1;

```

```

while j <= n-1 do
begin

```

```

tempwallout;
heatcoeff;
fy:=frt(y);
sum1:=sum1+fy;
y:=y+2*h;
j:=j+2;

```

```
end;
```

```

sum2:=0;
y:=start+2*h;
j:=2;

```

```
while j <= n-2 do
```

```
begin
```

```

tempwallout;
heatcoeff;

```

```

    fy:=firt(y);
    sum2:=sum2+fy;
    y:=y+2*h;
    j:=j+2;

    end;

    y:=start;
    tempwallout;
    heatcoeff;
    fy0:=firt(start);
    y:=final;
    tempwallout;
    heatcoeff;
    fyn:=firt(final);
    sol:=(fy0+fyn+4*sum1+2*sum2)*h/3;
    iii:=sol;

100 : end;

Procedure findtime; { for find time }

var  i,ii,iv : real;

begin

    i:=(1/k1)*(r0*r0/2)*ln(r1/r0)+(0.25/k1)*(r0*r0)-(0.25/k1)*(r1*r1);
    ii:=((r0*r0)-(r1*r1))*(0.5/k2)*ln(r2/r1);
    iv:=(tsat-twi)/(lo*L);
    simpson;
    time:=(i+ii-iii)/iv;

end;

begin

    clrscr;
    assign(smooth2,'smooth2.txt');
    rewrite(smooth2);
    inprop;
    input;
    writeln(smooth2,'OR of tube(m) = ',r2:8:5);
    writeln(smooth2,'IR of tube(m) = ',r1:8:5);
    writeln(smooth2,'Conductivity of ice(W/m.K) = ',k1:8:3);
    writeln(smooth2,'Density of ice (kg/m3) = ',lo:8:3);
    writeln(smooth2,'Latent heat of water(J/kg) = ',L:8:3);
    writeln(smooth2,'Conductivity of tube(W/m.K) = ',k2:8:3);
    writeln(smooth2,'Saturated temp. of NH3(K) = ',tsat:8:3);
    writeln(smooth2,'Inside tube surface temp.(K) = ',twi:8:3);
    writeln(smooth2);
    writeln(smooth2,'*-----*');
    writeln(smooth2);
    writeln(' Ice thickness(m)      Time(s)      Surface Temp.(K)      hnb(W/m2.k)  q(W)');
    writeln(smooth2,' Ice thickness(m)      Time(s)      Surface Temp.(K)      hnb(w/m2.K)  q(w)');

```

```

while r0<r1 do
begin

    findtime;
    y:=r0;
    tempwallout;
    heatcoeff;
    heatrate;
    thick:=r1-r0;
    writeln(' ',thick:8:5,'          ',time:8:4,'          ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);
    writeln(smooth2,' ',thick:8:5,'          ',time:8:4,'          ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);
    r0:= r0+step;

end;

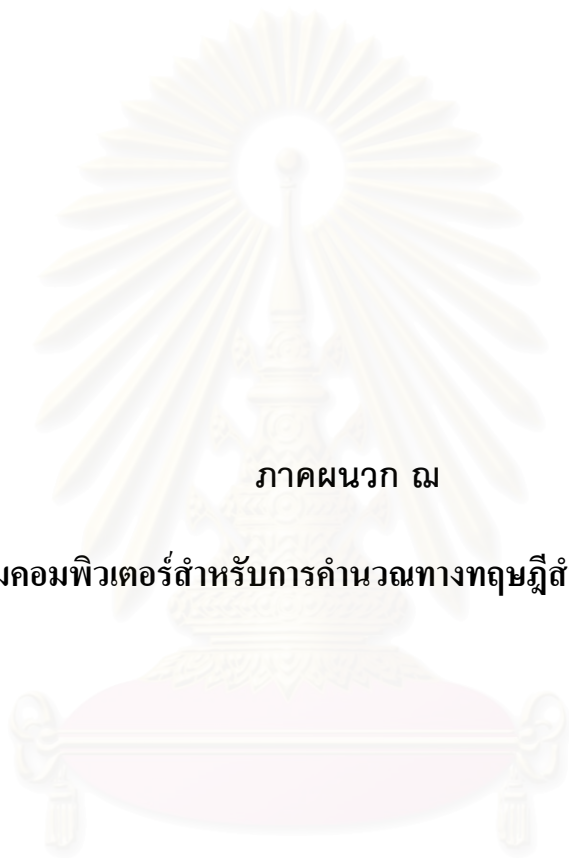
y:=r1;
findtime;
y:=r1;
    thick:=0;
    tempwallout;
    heatcoeff;
    heatrate;
    writeln(' ',thick:8:5,'          ',time:8:4,'          ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);
    writeln(smooth2,' ',thick:8:5,'          ',time:8:4,'          ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);

close(smooth2);
readln;

end.

```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฅ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับท่อผิวขรุขระ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Program pittedtube;

uses wincrt;

```
var aa,b,c,d,e,f,thick,step,iii, constant : real;
    q,r0,r1,r2,rt,k1,k2,dt,y : real;
    twi,tsat,two,time,hnb,lo,L : real;
    pitted1 : text;
```

Procedure calconst;

```
var gr1,gr2,gr3,gr4,gr5,gr6 : real;
    lol,hlv,cpl,mew1,delta,sigma,keta,efslon,tsat : real;
```

begin

```
writeln('Density of liquid amonia(kg/m3)= ');readln(lol);
writeln('Specific capacity heat of liquid(J/kg.K)= ');readln(cpl);
writeln('Latent heat(J/kg)= ');readln(hlv);
writeln('Viscosity of liquid(Ns/m2)= ');readln(mew1);
writeln('Surface tension(N/m)= ');readln(sigma);
writeln('Porosity of surface= ');readln(efslon);
writeln('porous layer thickness ');readln(delta);
writeln('ave. pore diameter= ');readln(keta);
```

```
gr1:=exp(-0.190*ln(keta/delta));
gr2:=exp(2*ln(mew1));
gr3:=exp(0.065*ln(gr2/(keta*lol*sigma)));
gr4:=cpl/hlv;
gr5:=exp(0.292*ln(keta/(hlv*mew1*efslon)));
gr6:=gr4/(0.137*gr1*gr3*gr5);
constant:=exp((1/0.292)*ln(gr6));
```

end;

procedure newton;
{for find [two-tsat]}

```
var x0,es,x,f,df,dx,tol,a : real;
    iter : integer;

Function func(x:real) : real;
```

begin

```
func:=exp(3.42457*ln(x))-x/(r2*c*a)+(twi-tsat)/(r2*c*a);
```

end;

```
Function deriv(x:real) : real;
```

begin

```
deriv:=3.42457*exp(2.42457*ln(x))-1/(r2*c*a);
```

end;

```

begin
    a:= -1*((1/k1)*ln(r1/y)+(1/k2)*ln(r2/r1));
    x0:=5;
    es:=0.001;
    x:=x0;

    repeat
        f:=func(x);
        df:=deriv(x);
        dx:=-f/df;
        x:=x+dx;
        tol:=abs(dx*100/x);
        until tol<es;
        dt:=x;
        {dt=two-tsat}
end;

Procedure input;
begin
    write('OR of tube(m) = ');readln(r2);
    write('IR of tube(m) = ');readln(r1);
    write('Conductivity of ice(W/m.K) = ');readln(k1);
    write('Density of ice (kg/m3) = ');readln(lo);
    write('Latent heat of water(J/kg) = ');readln(L);
    write('Conductivity of tube(W/m.K) = ');readln(k2);
    write('Least R of hole of ice(m){max.thick} = ');readln(r0);
    write('Step of ice growth rate(m) = ');readln(step);
    write('Saturated temp. of ammonia(K) = ');readln(tsat);
    twi:= 273.15; {0 C}
end;

Procedure heatcoeff;
{Find nucleate boiling heat transfer coefficient}
begin
    hnb:= constant*exp(2.42457*ln((two-tsat)));
end;

Procedure tempwallout;
{Find temperature on outside surface of tube}
begin
    newton;
    two:=tsat+dt;
end;

Procedure heatrate;
{Find heat flow from inside of tube to refrigerant}

```

```

begin
    aa:= exp((1/k1)*ln(r1/r0));
    b:= exp((1/k2)*ln(r2/r1));
    d:= 2*pi*(twi-tsat);
    e:= ln(aa*b);
    f:= 1/(r2*hnb);
    q:= d/(e+f);

end;

Procedure simpson;

label 50,100;
var    start,final,h,sum1,sum2,fy,fy0,fyn,sol : real;
       m,n,j : integer;

Function frt(y:real): real;

begin
    frt:=y/(hnb*r2);

end;

begin
    start:=r0;
    final:=r1;
    n:=100;
    m:=n-trunc(n/2)*2;
    if m=0 then goto 50;
    goto 100;
50 : h:=(final-start)/n;
    sum1:=0;
    y:=start+h;
    j:=1;

    while j <= n-1 do
        begin
            tempwallout;
            heatcoeff;
            fy:=frt(y);
            sum1:=sum1+fy;
            y:=y+2*h;
            j:=j+2;

        end;

    sum2:=0;
    y:=start+2*h;
    j:=2;

    while j <= n-2 do

```

```

begin

tempwallout;
heatcoeff;
fy:=frt(y);
sum2:=sum2+fy;
y:=y+2*h;
j:=j+2;

end;

y:=start;
tempwallout;
heatcoeff;
fy0:=frt(start);
y:=final;
tempwallout;
heatcoeff;
fyn:=frt(final);
sol:=(fy0+fyn+4*sum1+2*sum2)*h/3;
iii:=sol;

100 : end;

```

```

Procedure findtime;
{ for find time }

```

```

var    i,ii,iv : real;

```

```

begin

```

```

i:=(1/k1)*(r0*r0/2)*ln(r1/r0)+(0.25/k1)*(r0*r0)-(0.25/k1)*(r1*r1);
ii:=((r0*r0)-(r1*r1))*(0.5/k2)*ln(r2/r1);
iv:=(tsat-twi)/(lo*L);
simpson;
time:=(i+ii-iii)/iv;

```

```

end;

```

```

begin

```

```

clrscr;
assign(pitted1,'pitted1.txt');
rewrite(pitted1);
calconst;
input;
writeln(pitted1,'OR of tube(m) = ',r2:8:5);
writeln(pitted1,'IR of tube(m) = ',r1:8:5);
writeln(pitted1,'Conductivity of ice(W/m.K) = ',k1:8:3);
writeln(pitted1,'Density of ice (kg/m3) = ',lo:8:3);
writeln(pitted1,'Latent heat of water(J/kg) = ',L:8:3);
writeln(pitted1,'Conductivity of tube(W/m.K) = ',k2:8:3);
writeln(pitted1,'Saturated temp. of NH3(K) = ',tsat:8:3);
writeln(pitted1,'Inside tube surface temp.(K) = ',twi:8:3);
writeln(pitted1);
writeln(pitted1,'*-----*');

```

```

writeln(pitted1);
writeln(' Ice thickness(m)   Time(s)   Surface Temp.(K)   hnb(W/m2.k)   q(W)');
writeln(pitted1,' Ice thickness(m)   Time(s)   Surface Temp.(K)   hnb(w/m2.K)
q(w)');

while r0<r1 do

begin

findtime;
y:=r0;
tempwallout;
heatcoeff;
heatrate;
thick:=r1-r0;
writeln(' ',thick:8:5,' ',time:8:4,' ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);
writeln(pitted1,' ',thick:8:5,' ',time:8:4,' ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);
r0:= r0+step;

end;

y:=r1;
findtime;
y:=r1;
thick:=0;
tempwallout;
heatcoeff;
heatrate;
writeln(' ',thick:8:5,' ',time:8:4,' ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);
writeln(pitted1,' ',thick:8:5,' ',time:8:4,' ',two:8:3,' ',hnb:8:3,' ',q:8:3);

close(pitted1);
readln;

end.

```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูวนาท กาบคำ เกิดวันที่ 24 เมษายน พุทธศักราช 2522 ที่ อำเภอ เมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2538 ต่อมาสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย